

平成 27 年 (2015 年) 度「宮水学園」マスター講座〈前期〉

日常は物理で満ちている —こんなところに自然法則—



真貝寿明

第 9 回 9 月 4 日 原子核の物理——核融合と核分裂の果て

第 10 回 9 月 18 日 タイムマシンの物理——相対性理論入門



2015年10月6日発売

272ページ, 図版400点以上, 2200円+税

真貝寿明 (しんかいひさあき)
一九六六年東京都生まれ。大阪工業大学情報科学部教授。早稲田大学理工
学部物理学科卒業。同大学院博士課程修了。博士(理学)。早稲田大学助手、
ワシントン大学(米国セントルイス)博士研究員、ペンシルバニア州立大学
客員研究員(日本学術振興会海外特別研究員)、理化学研究所基礎科学特別
研究員などを経て現職。著書に『徹底攻略微分積分』『徹底攻略常微分方
程式』『徹底攻略確率統計』(以上、共立出版)、『図解雑学タイムマシンと
時空の科学』(ナツメ社)、『日常の「なぜ」に答える物理学』(森北出版)な
どがある。



9784334038779



1920242009007

ISBN978-4-334-03877-9

C0242 ¥900E

定価(本体900円+税)

ブラックホール・膨張宇宙・重力波

真貝寿明



光文社新書

774

ブラックホール・
膨張宇宙・重力波
一般相対性理論の100年と展開



真貝寿明

光文社新書

774

2015年は、アルベルト・アインシュタインが一般相対性理論を創り上げ
てから、ちょうど100年にあたる。一般相対性理論は20世紀の物理学を
一変させたが、この理論が描く世界は、アインシュタイン自身の想像を超
えるほど奇妙なものだった。
本書では、誕生から今日までの100年の間に、一般相対性理論がどのよう
に理解されてきたのかを俯瞰すると同時に、ブラックホール(膨張宇宙)
(重力波)という、アインシュタイン自身が一度は拒否反応を示したものの、
現在では研究の主流となっている3つのトピックを概観。現代物理学の知
見は私たちに何をもたらすのか――最新の研究成果を交えて探る。

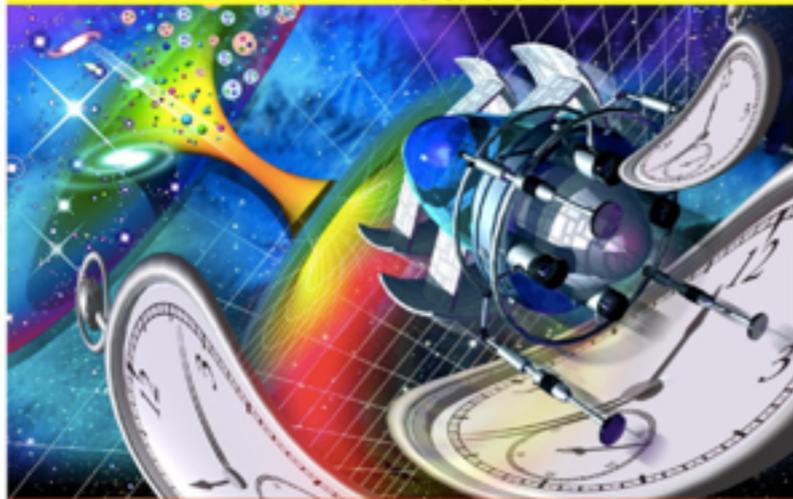
2015年9月16日発売

344ページ、図版54点、900円+税

絵と文章でわかりやすい!

図解雑学 タイムマシンと 時空の科学

大阪工業大学准教授 真貝寿明 著



タイムマシンに関連する最新の物理学研究を紹介し、タイムトラベルの可能性と問題点をやさしく解説します。物理や宇宙の不思議な世界へご招待!

ナツメ社

2011年3月発売

1400円+税



ワームホールもタイム マシンも加速器でできる?

～可能性はゼロではないが～

もしLHC加速器で本当にブラックホールができて高次元時空の存在が確認されたならば、人類の世界観を大きく変えるニュースになるだろう。

ブラックホールの話について「LHCでタイムマシンができる可能性がある」という論文もウェブに発表された¹²⁾。LHCでブラックホールができるなら、空間の離れた2点を結ぶ時空の抜け道「ワームホール」もできるかもしれない。ワームホールができるならば、時間の離れた2点を結ぶタイムマシンもできるかもしれない。

しかし、「LHCでタイムマシン」という話には少し(だいぶ?)無理があるようだ。本書の後半で詳しく説明するが、「ブラックホールができるかもしれない」というところまでは「そうかもしれない」と期待を抱く物理学者が多いが、ワームホールとなるとたんに夢物語になる。いくつかのモデルや仮定に基づいた話であって、あくまでも「可能性がゼロではない」という程度だ。

しかしこのように、最先端の物理学でも、タイムマシンができるかどうか、という話は時折登場する真面目なトピックである。

ブラックホール・ワームホールやタイムマシンは、いずれも「時間」や「空間」に関わる話である。これらは相対性理論を使う研究対象だ。タイムマシンなんてできるはずがない、と初めから諦めず、数式を駆使してなんとかタイムマシンが実現できないかと密かに考えている学者も多い。時空に関わる最先端の物理学を紹介しながら、本書ではタイムマシンに関連する物理学を説明してゆこう。



光速+光速=光速

～正しい足し算の完成～

「どのような座標系から見ても光速は同じである」という原理は、日常の感覚からは信じがたいが、そうなるような新しい速度の足し算をアインシュタインは提案した。

ニュートンの力学では、 v_1 の速度で動く電車の中で、 v_2 の速度でボールを投げた場合、ボールの速度を地上から見ると v_1+v_2 になる。これは我々が日常的に正しいと思っている速度の足し算である。光の速度 c で飛ぶロケットが進行方向に光を出したら、 $2c$ の速度の光になりそうである。

しかし、相対性理論では、速度の足し算は v_1+v_2 ではなく、

$$v_1 \text{ と } v_2 \text{ の和は、 } v = \frac{v_1 + v_2}{1 + (v_1 \times v_2 / c^2)} \text{ となる}$$

と結論する。

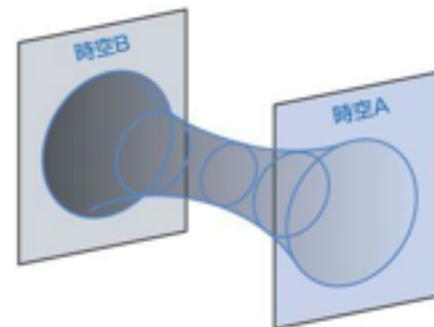
試しにいくつかの値を代入してみよう。

- ・ v_1 も v_2 も光速の0.1%のとき、 v_1 と v_2 の和は、0.1999998%。これは、0.2%と100万分の2しか違わない。
- ・ v_1 も v_2 も光速の10%のとき、 v_1 と v_2 の和は、光速の19.802%。
- ・ v_1 も v_2 も光速の90%のとき、 v_1 と v_2 の和は、光速の99.448%。
- ・ v_1 も v_2 も光速 c のとき、 v_1 と v_2 の和は、光速 c 。

つまり、たとえ速度 c のロケットから光を前方に放出しても、地上の人からは、光は光速 c で伝播することになる。

我々が日常に感じる v_1+v_2 という足し算は、光速よりずっと遅い速度を考えているので「近似的に」正しい式になっている、というのが相対性理論の結論である。

タイムマシンを“真面目”に研究



LHCで「ワームホール型タイムマシン」ができる確率は、ブラックホールができる確率に比べれば計算できないくらい低い。



タイムマシンが実際にできるかどうかは別にして、ワームホールやタイムマシンをめぐる話が最先端物理学の研究対象であることは確かだよ。

アインシュタイン

タイムマシンはできる!

いや、できない!!

Einstein

Einstein

理論物理学者たちは真面目に聞いている。

正しい速度の足し算はこうなる

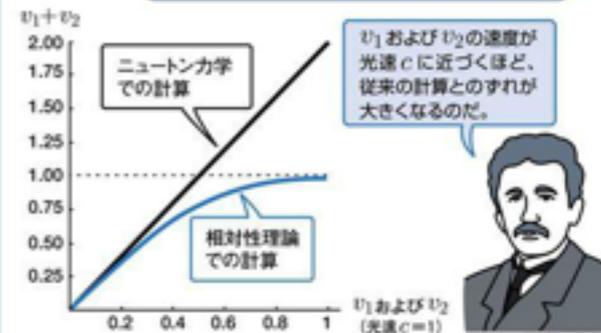


ニュートン力学での計算

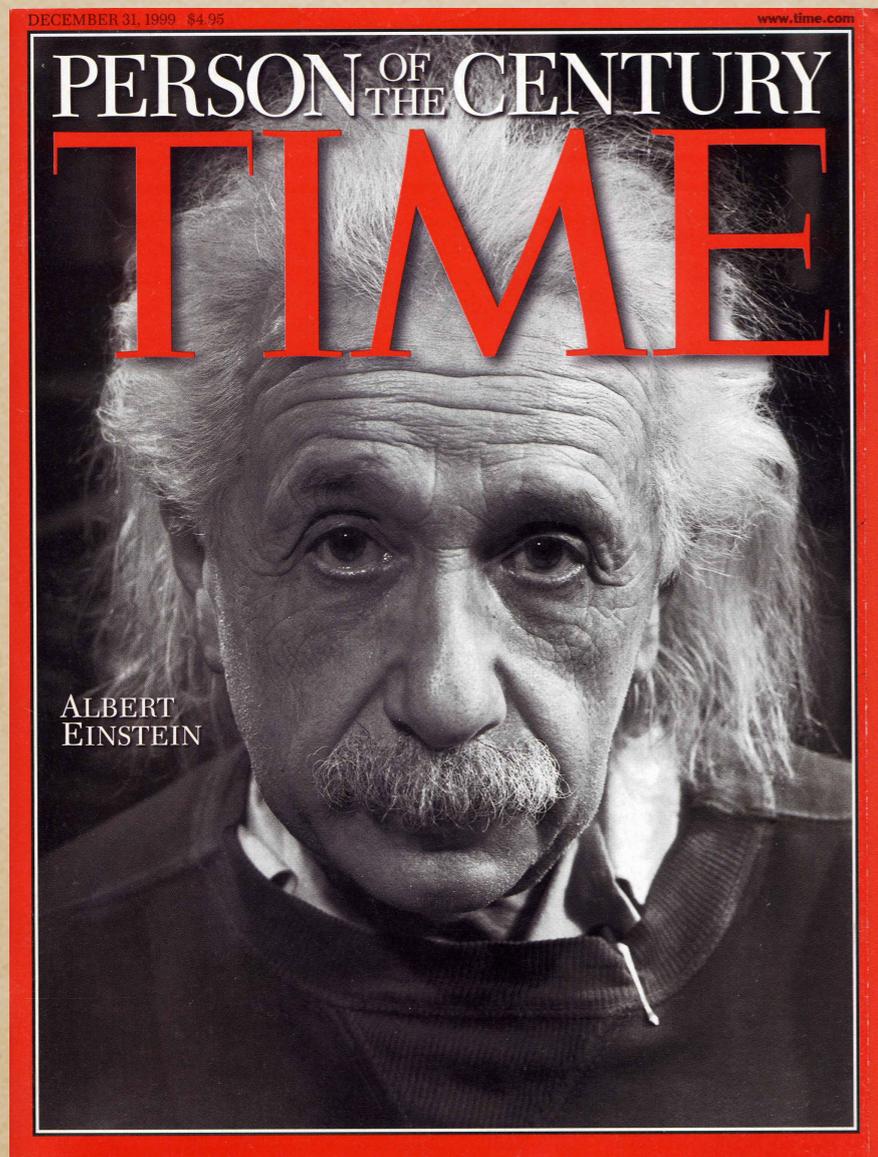
$$v = v_1 + v_2 \text{ --- 単純な足し算}$$

相対性理論での計算

$$v = \frac{v_1 + v_2}{1 + (v_1 \times v_2 / c^2)} \text{ (cは光速)}$$



アインシュタイン



アルベルト・アインシュタイン
1879 (明治12)/3/14
~1955 (昭和30)/4/18

Time
1999/12/31

近代物理学の進展

1600

1700

1800

1900

1905

天文学

ガリレイ
ケプラー

電磁気学

ファラデー
マクスウェル

熱学

光学

流体力学

力学

解析力学

ニュートン

ラグランジュ
ハミルトン

物理学完成!?

現代物理学の発展

1905

1916

1925

1960s

1980s

一般相対性理論

特殊相対性理論

ブラウン運動

光電効果



統計力学

量子力学

物性物理

原子核理論

物理化学

場の理論

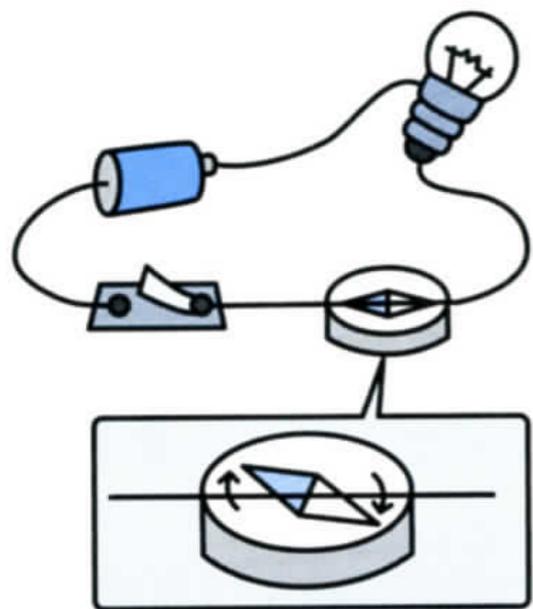
生物物理

複雑系

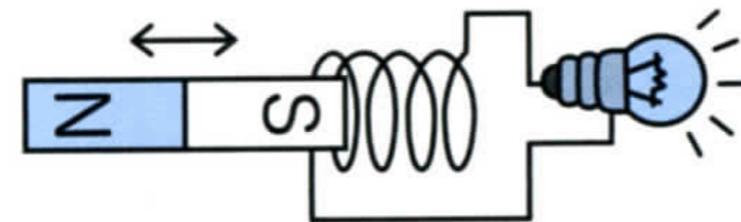
経済物理

素粒子論

電磁気学の進展



電流が流れると方位磁針の針が振れる。



ファラデー

コイルに磁石を出し入れすると電流が流れるぞ。

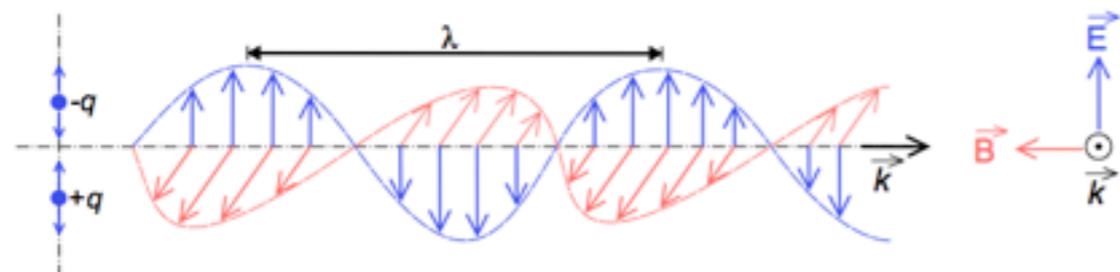
電磁誘導現象の発見 (1831年)

電気力と磁石の力は関係しあうから「電磁気学」としてまとめよう。

電磁気現象を説明する「マクスウェルの方程式」を完成させ (1864年)、電場と磁場が互いに作用して電磁波として伝わることを示す。



マクスウェル



ヘルツ

電磁波は確かに光の速さで伝わっていた。

電磁波 (電波) の受発信に成功し、光の電磁波説を実証する (1888年)

電磁気学の完成 (Maxwell, 1864)

電磁気学の基本方程式 (1864)

次の4本の方程式から成り立つ。 E は電場ベクトル, B は磁場ベクトル, ρ は電荷密度, j は電流ベクトル, c は光速とする。また, ∇ は微分演算子とする。

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi\rho, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}, \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0, \quad (4)$$

具体的には, 各ベクトルは

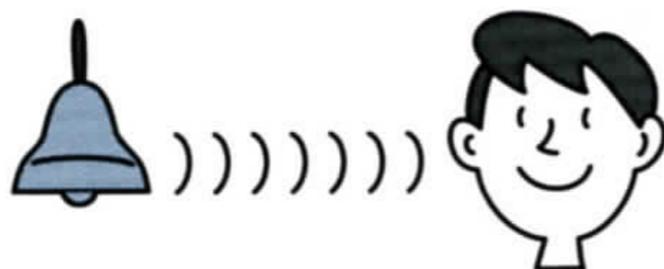
$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix}, \quad \nabla = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix}$$

などと書け, \cdot と \times はベクトルの内積と外積を表す。したがって, 具体的には

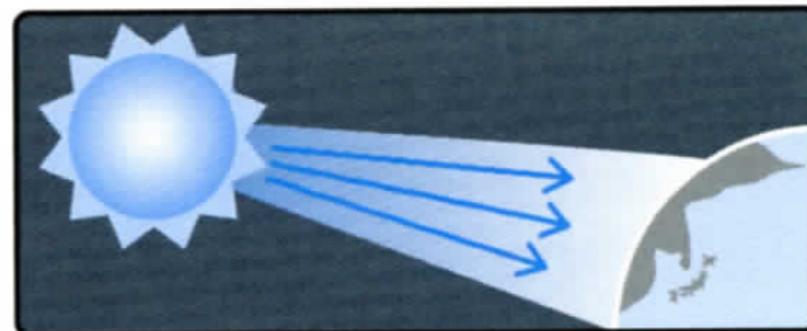
$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z}, \quad \nabla \times \mathbf{E} = \begin{pmatrix} \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \end{pmatrix}$$

電磁気学で生じた疑問

疑問1 電磁波を伝えるもの(媒質)は何か?



音波は空気中の分子の振動が伝える。

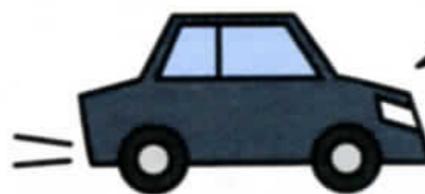


電磁波(光)は真空中を満たす未知の媒質エーテルが伝える?

疑問2 電磁波が伝わる速度が「光速」であるとは、誰から見た時の光速なのか?



時速140km



時速120km

車中の人からはパトカーの速度は時速20kmに見える。
(速度は相対的なもの)

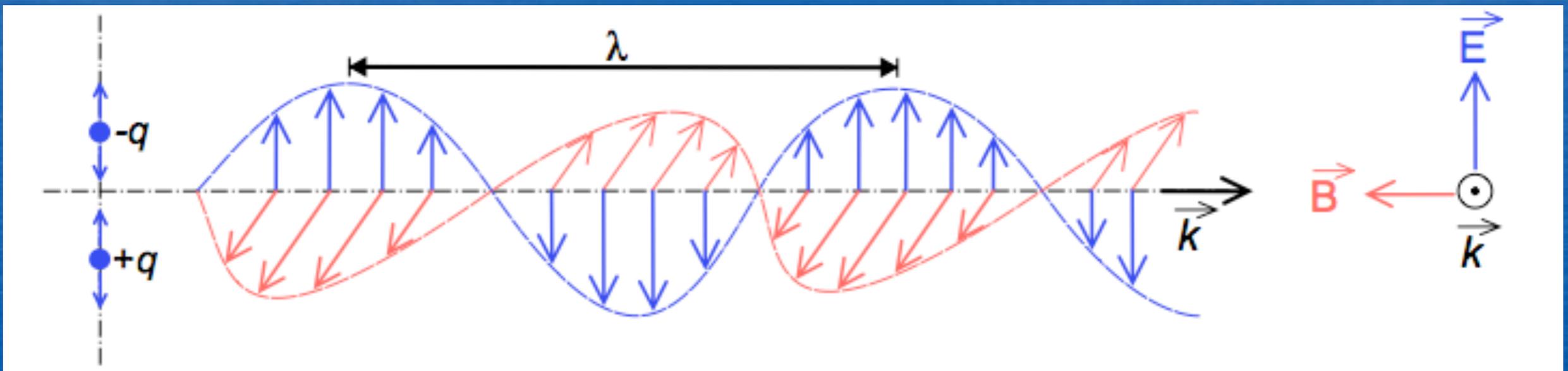
特殊相対性理論 【概略】

- 電磁気学の方程式に、光速 c が登場した。
どの座標系で見たかを議論していないのに……

$$\left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \Delta\right) \mathbf{E} = 0, \quad \left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \Delta\right) \mathbf{B} = 0, \quad \text{where } \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

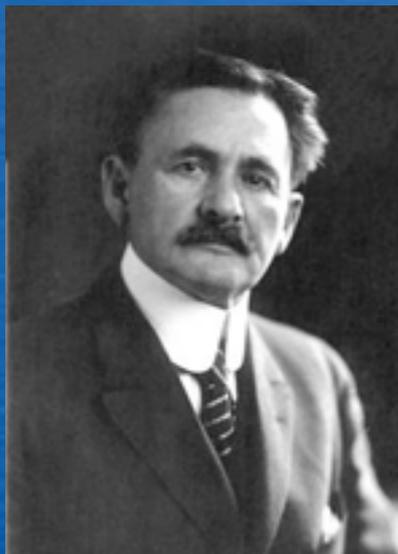
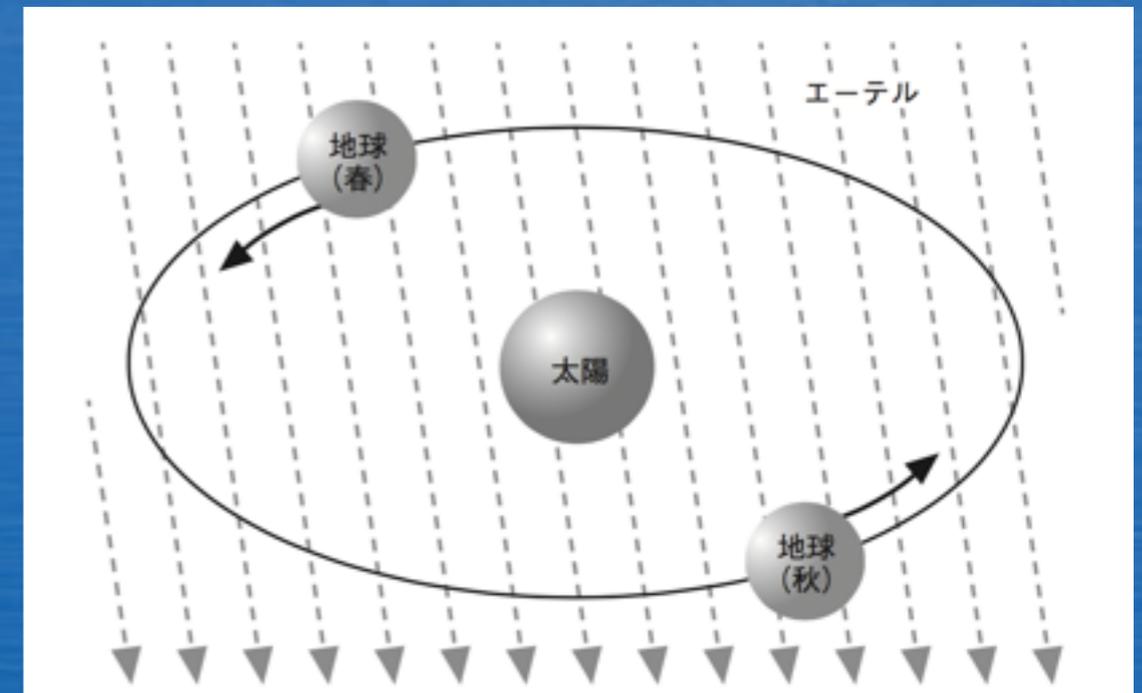
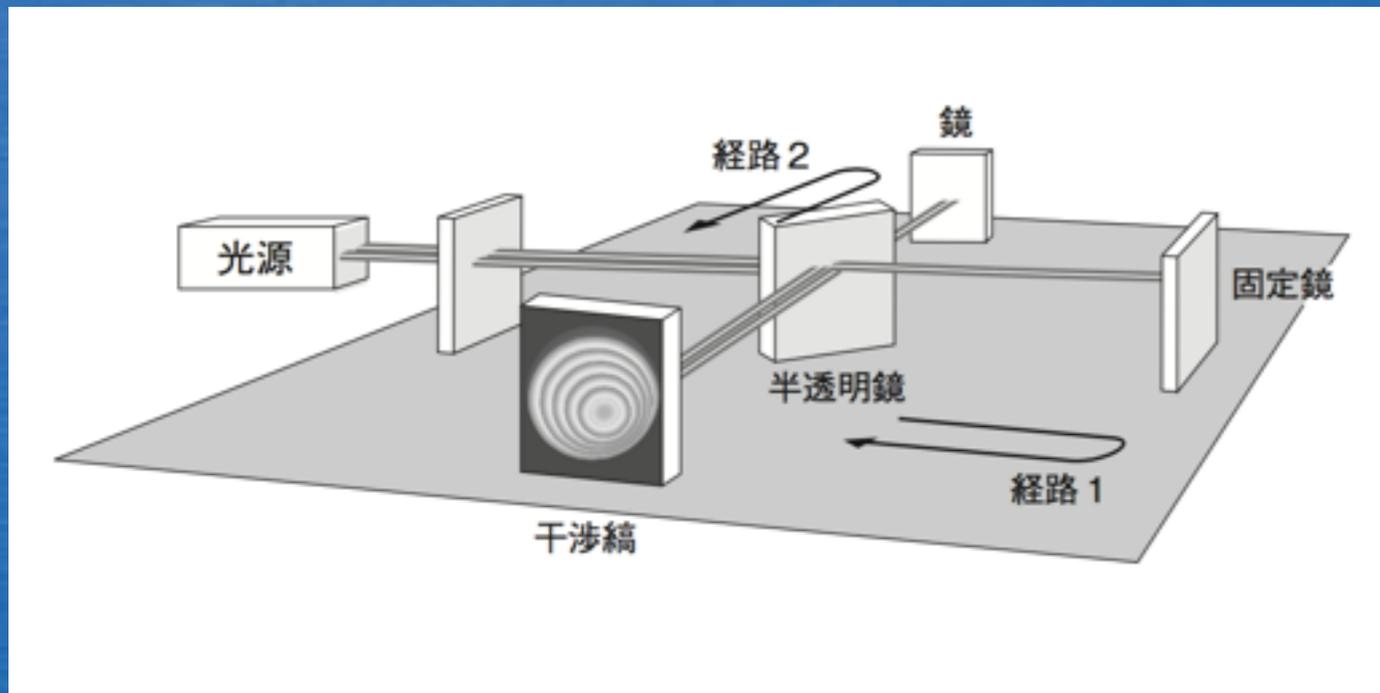
- 特別な慣性系の存在？ 光を伝える媒質の存在？

= 「エーテル」



マイケルソン・モーリーの実験

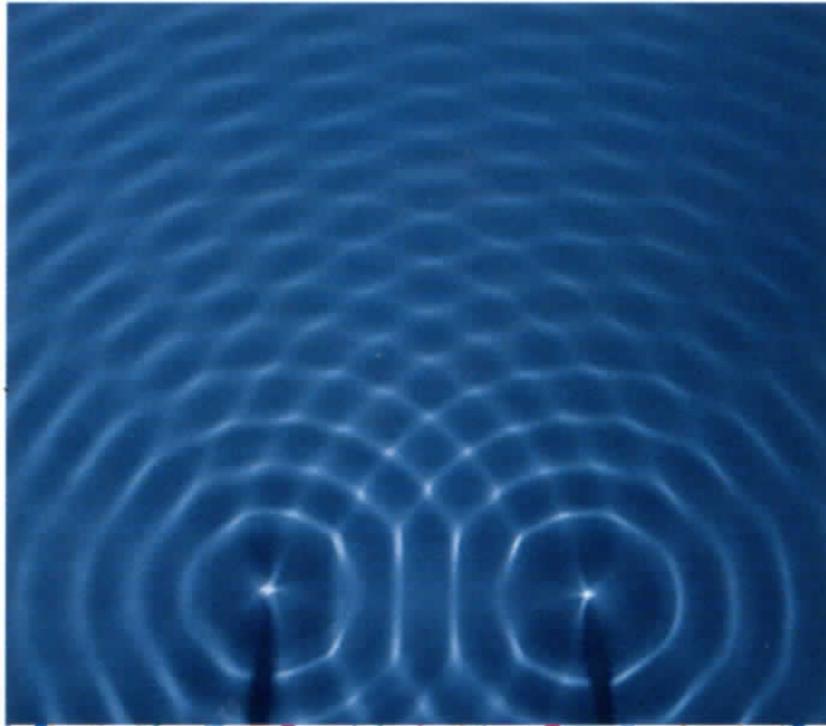
Michelson-Morley experiment 1887



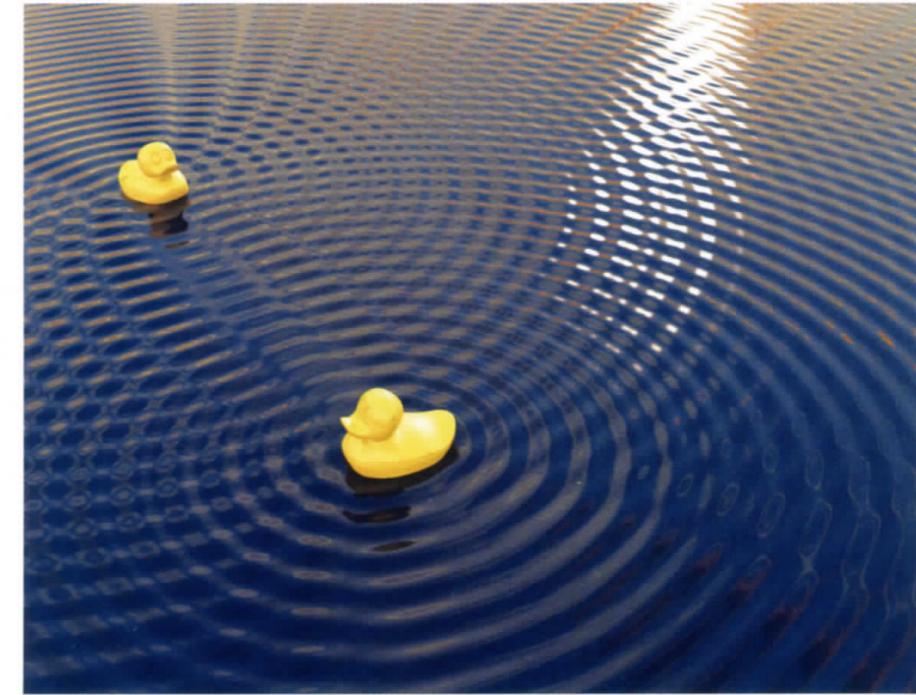
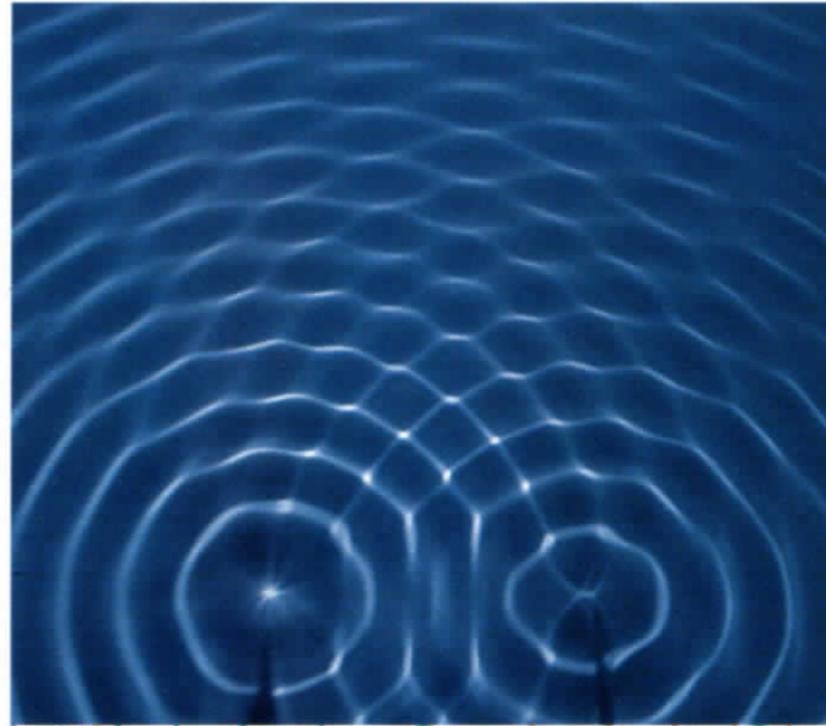
エーテルがあれば、季節で距離が変わるはず。微妙な差でも、干渉計なら測れるはず。

波の干渉 = 強めあったり弱めあったりする現象

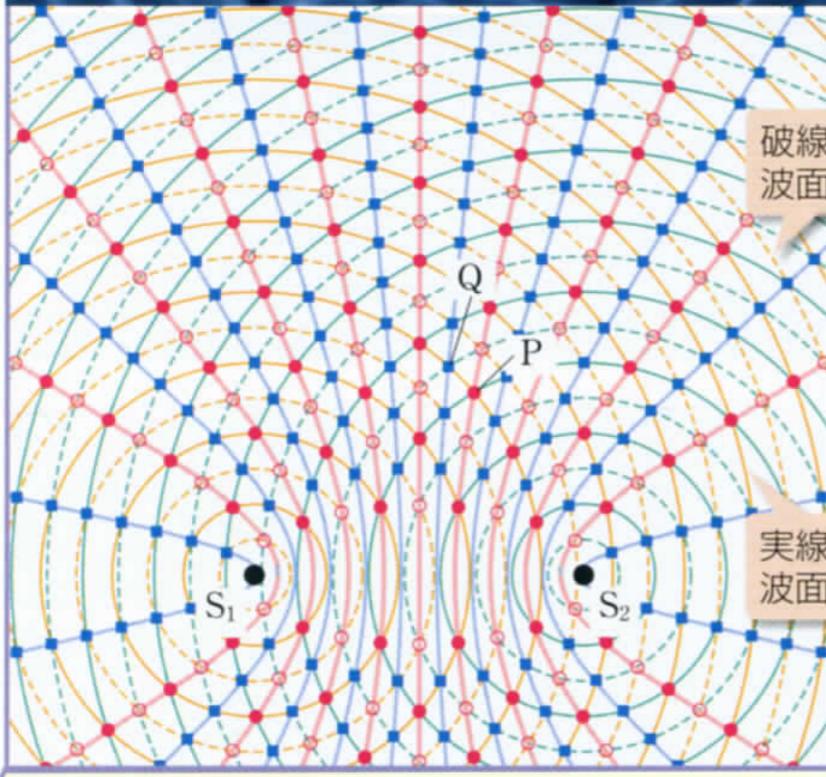
● 同位相で振動する 2 つの波源の場合



● 逆位相で振動する 2 つの波源の場合

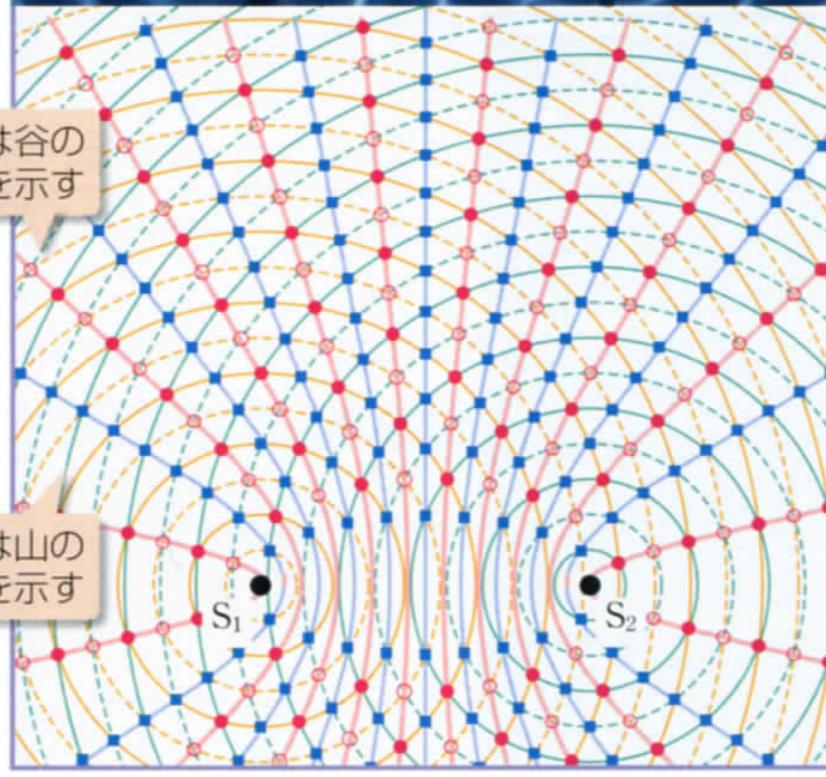


Puddle Interference The concept of interference shows up in everyday life in bodies of water, from puddles to oceans.



破線は谷の波面を示す

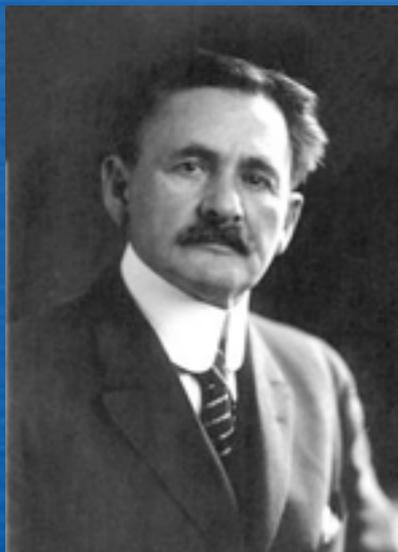
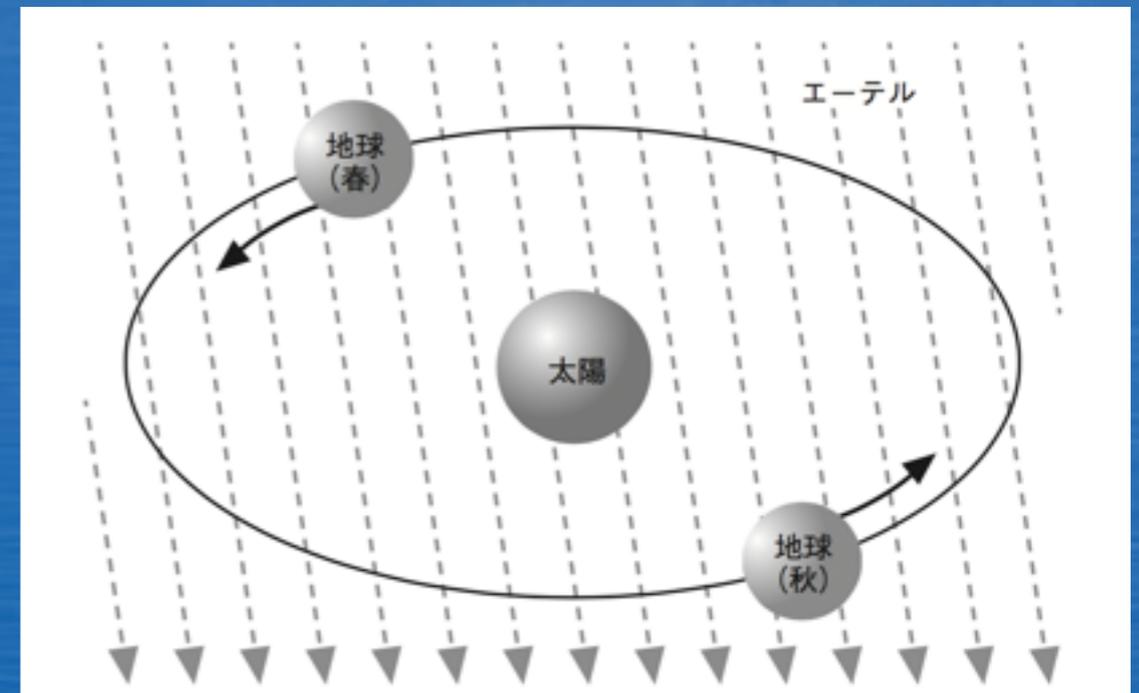
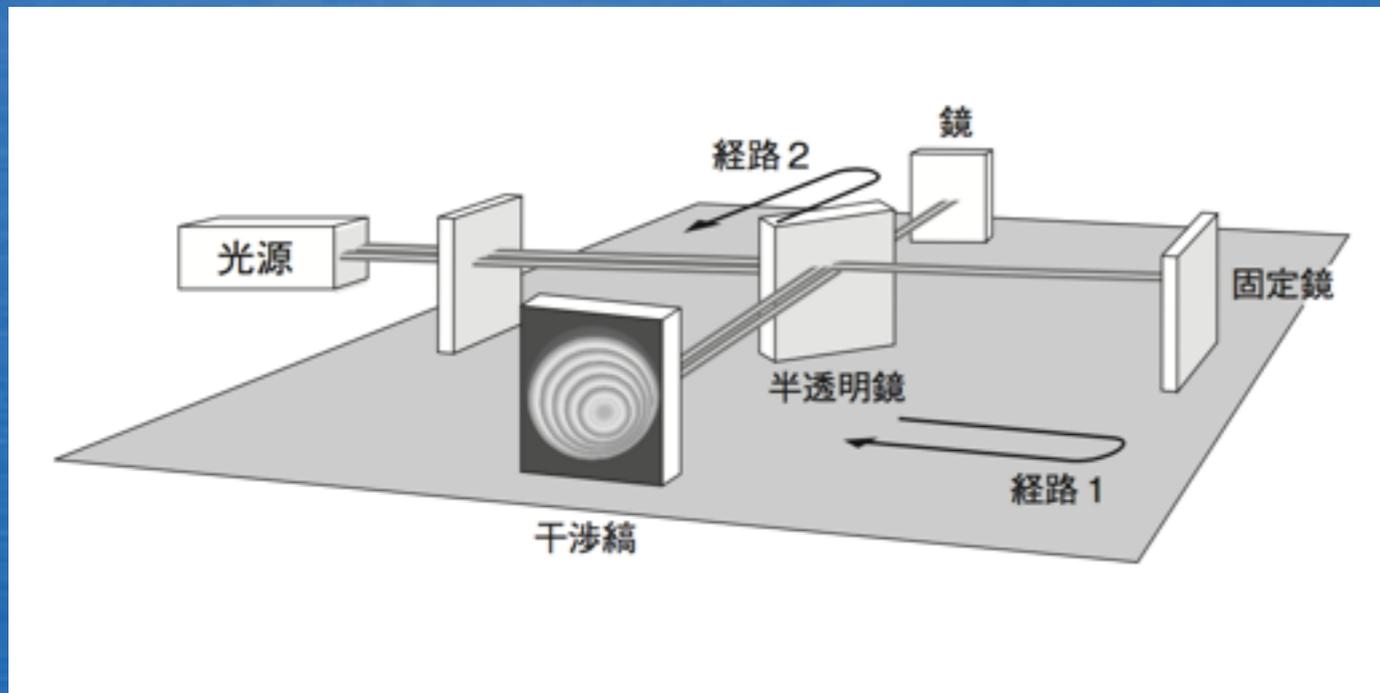
実線は山の波面を示す



赤色で示した曲線(双曲線) ——— は強めあう点を連ねて得られる曲線で、●(山と山)や○(谷と谷)の状態が移動していく経路を表している。
青色で示した曲線(双曲線) ——— は、打ち消しあう点(■(山と谷))を連ねて得られる曲線であり、節線という。

マイケルソン・モーリーの実験

Michelson-Morley experiment 1887



エーテルがあれば、季節で距離が変わるはず。微妙な差でも、干渉計なら測れるはず。

→ エーテルの検出に「失敗」

特殊相対性理論 【概略】

- 電磁気学の方程式に，光速 c が登場した。
どの座標系で見たかを議論していないのに……

$$\left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \Delta\right) \mathbf{E} = 0, \quad \left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \Delta\right) \mathbf{B} = 0, \quad \text{where } \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

- ~~特別な慣性系~~の存在？ ~~光~~を伝える~~媒質~~の存在？



相対性原理

「すべての自然法則は，あらゆる慣性系で同じである」

光速不変の原理

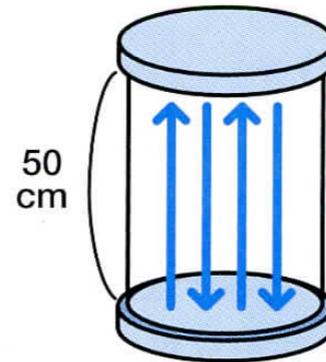
「相互作用は有限の速度で伝わる．最大値が光速である」

光速はどの座標系から見ても一定である．

＝時間の進み方は，絶対的なものではない．

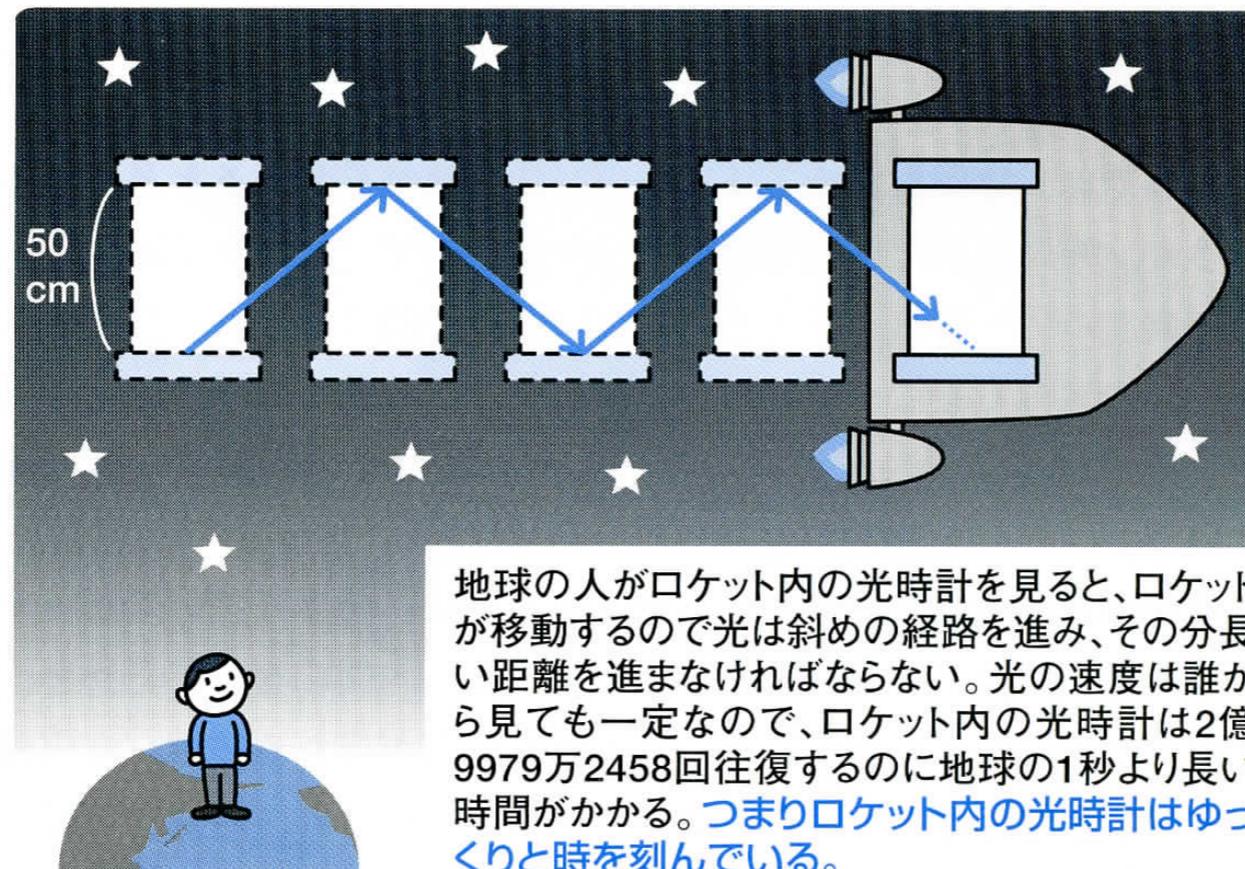
時間の進み方は相対的

光時計の 思考実験



光時計

光が2億9979万2458回往復すると「1秒」を刻む時計



地球の人がロケット内の光時計を見ると、ロケットが移動するので光は斜めの経路を進み、その分長い距離を進まなければならない。光の速度は誰から見ても一定なので、ロケット内の光時計は2億9979万2458回往復するのに地球の1秒より長い時間がかかる。つまりロケット内の光時計はゆっくりと時を刻んでいる。

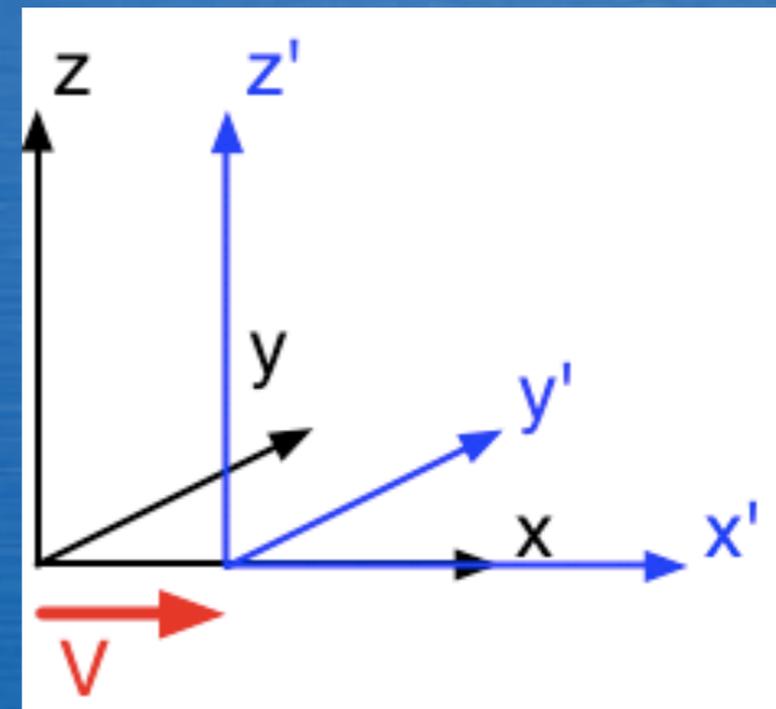
動いている人の時間の進み方は、静止している人よりも遅い

特殊相対性理論 【時間の相対性】

- 動いている座標と静止している座標との変換則（ローレンツ変換）

$$\begin{pmatrix} t' \\ x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & -\gamma v/c^2 & 0 & 0 \\ -\gamma v & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$



- 時間の進み方だけを考えて、

$$dt' = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} dt$$

動いている人の時間の進み方は、静止している人よりも遅い。

特殊相対性理論 【速度の合成】

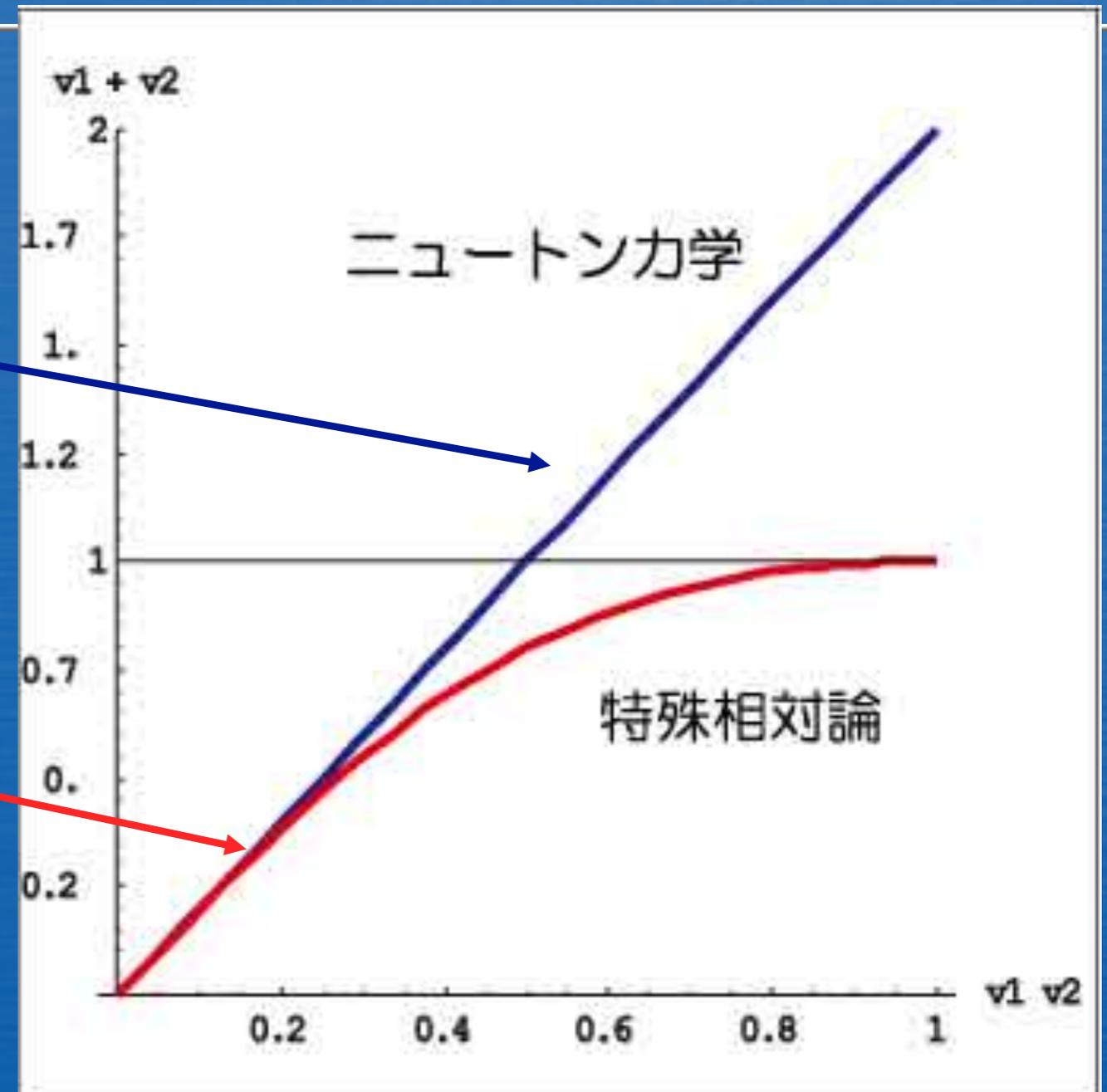
速度の足し算 (ニュートン力学)

$$V = V_1 + V_2$$

速度の足し算 (特殊相対性理論)

$$V = \frac{V_1 + V_2}{1 + (V_1 V_2 / c^2)}$$

光速 + 光速 = 光速



光速 + 光速 = 光速

特殊相対性理論では，速度の足し算は $v_1 + v_2$ ではなく，

$$\frac{v_1 + v_2}{1 + (v_1 v_2 / c^2)}$$

v_1	v_2	$v_1 + v_2$
光速の 0.1%	光速の 0.1%	光速の 0.19999998%
光速の 10%	光速の 10%	光速の 19.802%
光速の 90%	光速の 90%	光速の 99.448%
光速	光速	光速

2. 特殊相対性理論：光速に近いときの力学

不思議の国のトムキンス

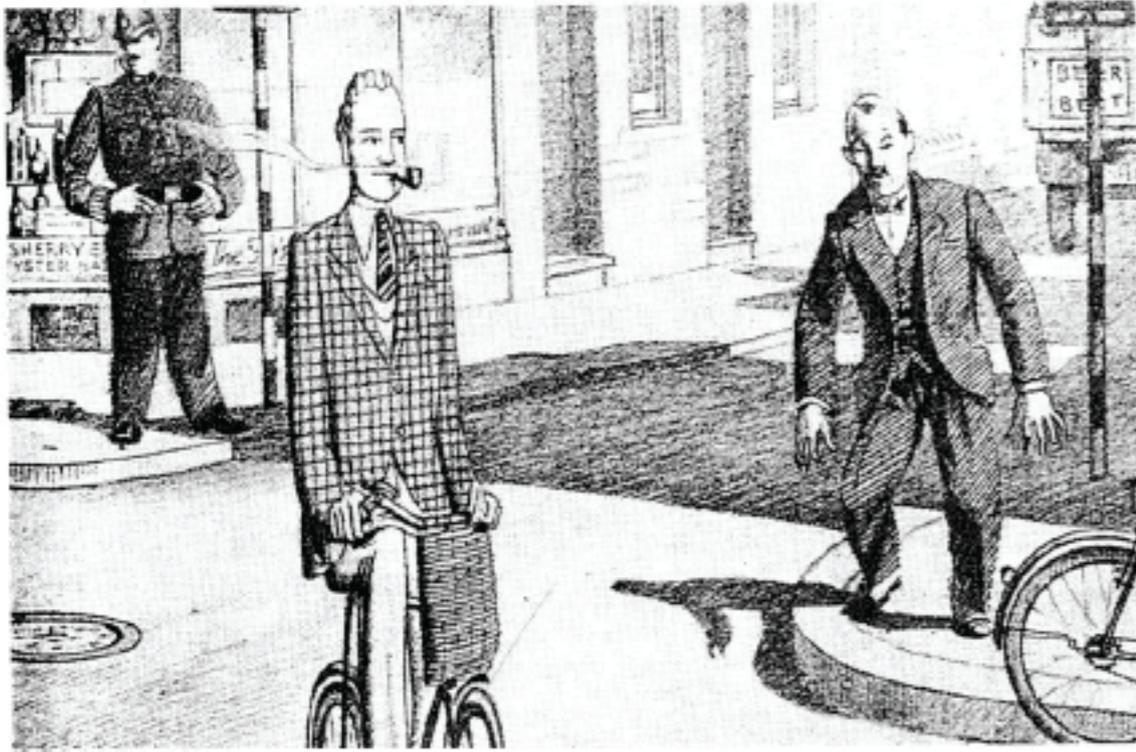
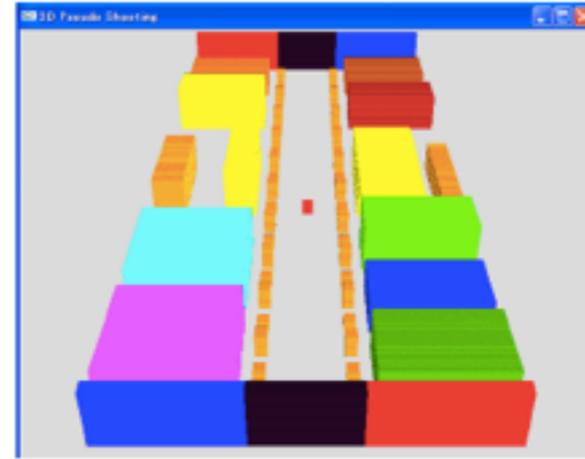


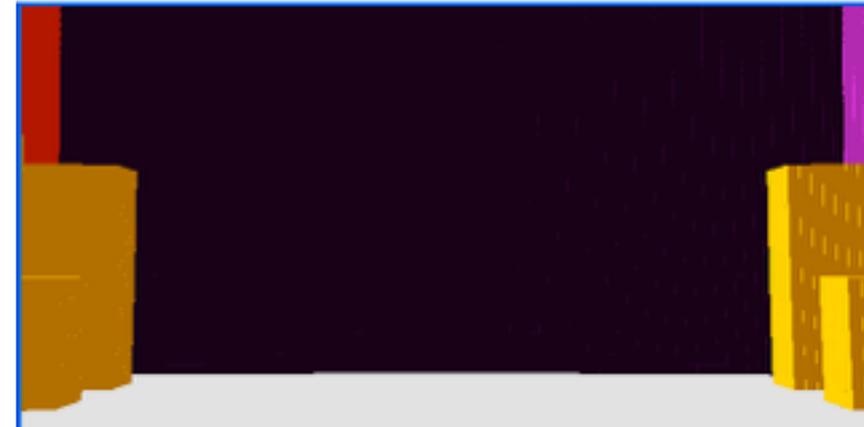
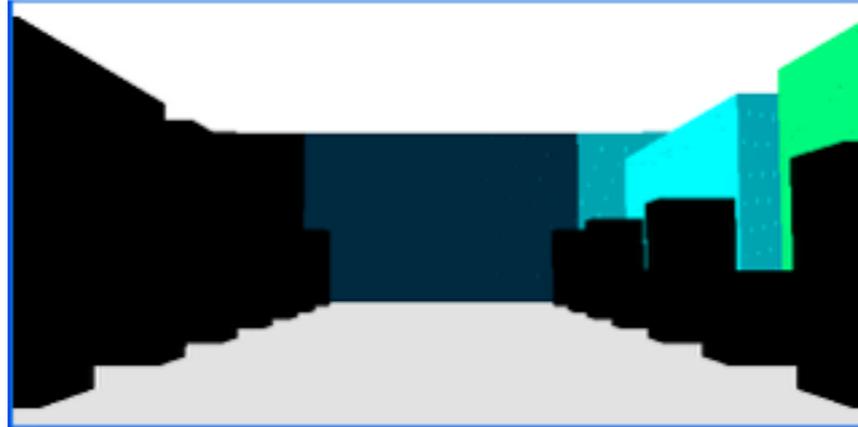
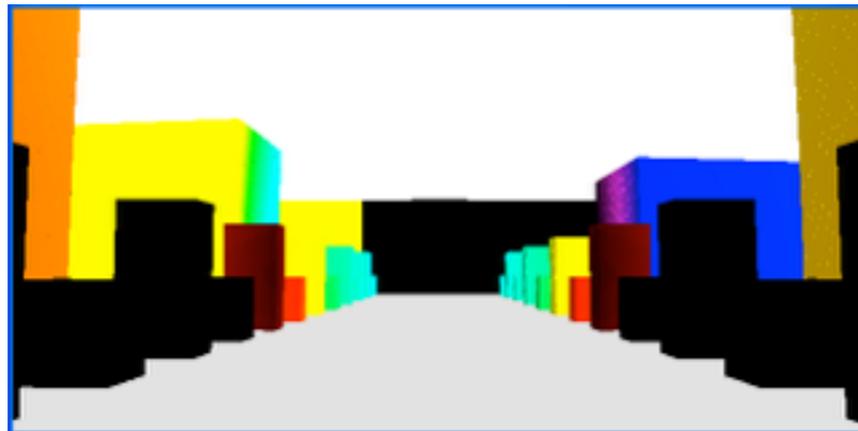
図4 ガモフ著『不思議の国のトムキンス』の挿絵。最高速度が時速 30 km/s の世界では、自転車で移動する人からみると世界が歪んで見え、止まっている人から自転車の人を見ると平たく見える。

準光速ロケットから見える世界(2)

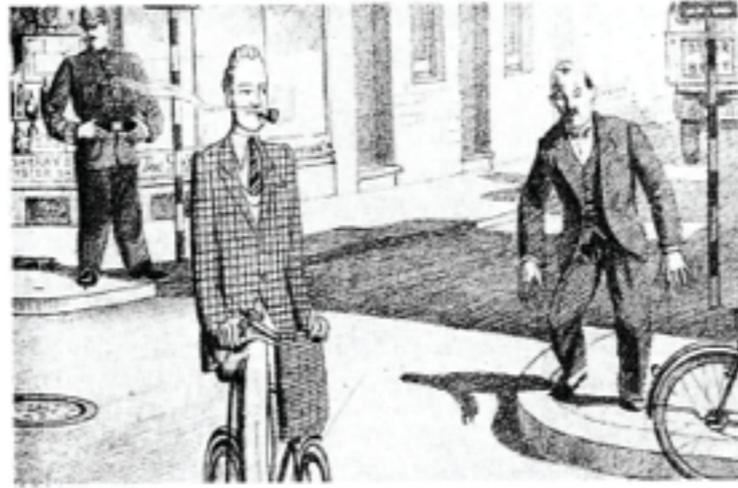
$v=0$



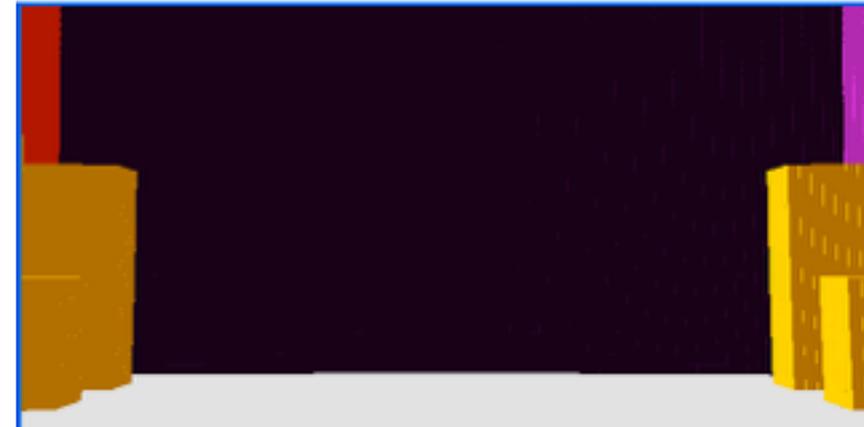
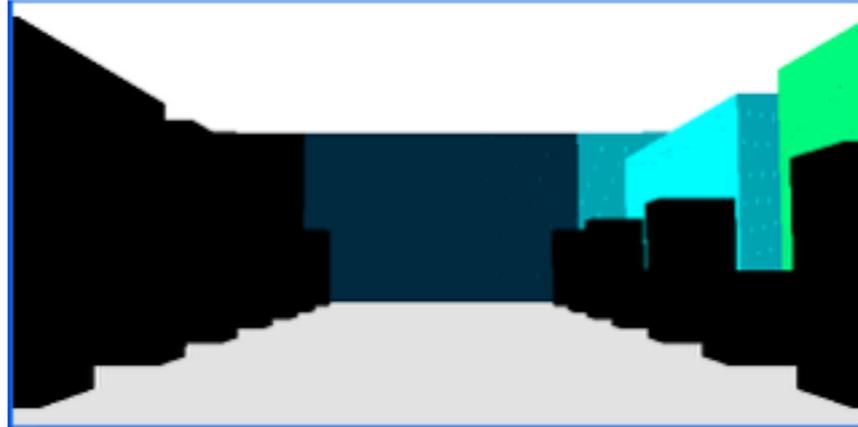
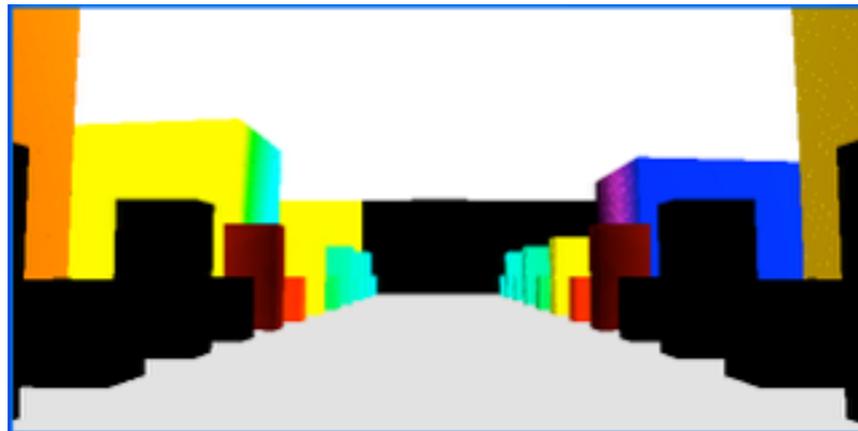
$v=0.8c$



準光速ロケットから見える世界(3)



$v=0.8c$



特殊相対性理論 【ウラシマ効果】

- 動いている人の時間の進み方は、静止している人よりも遅い。

$$dt' = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} dt$$

- 「水の江の浦の島子を詠める一首」（万葉集 巻九 1740-41）
……家ゆ出でて 三歳の中に 垣もなく 家滅せめやと……

3年間竜宮城にいる間に、300年も経っていた。

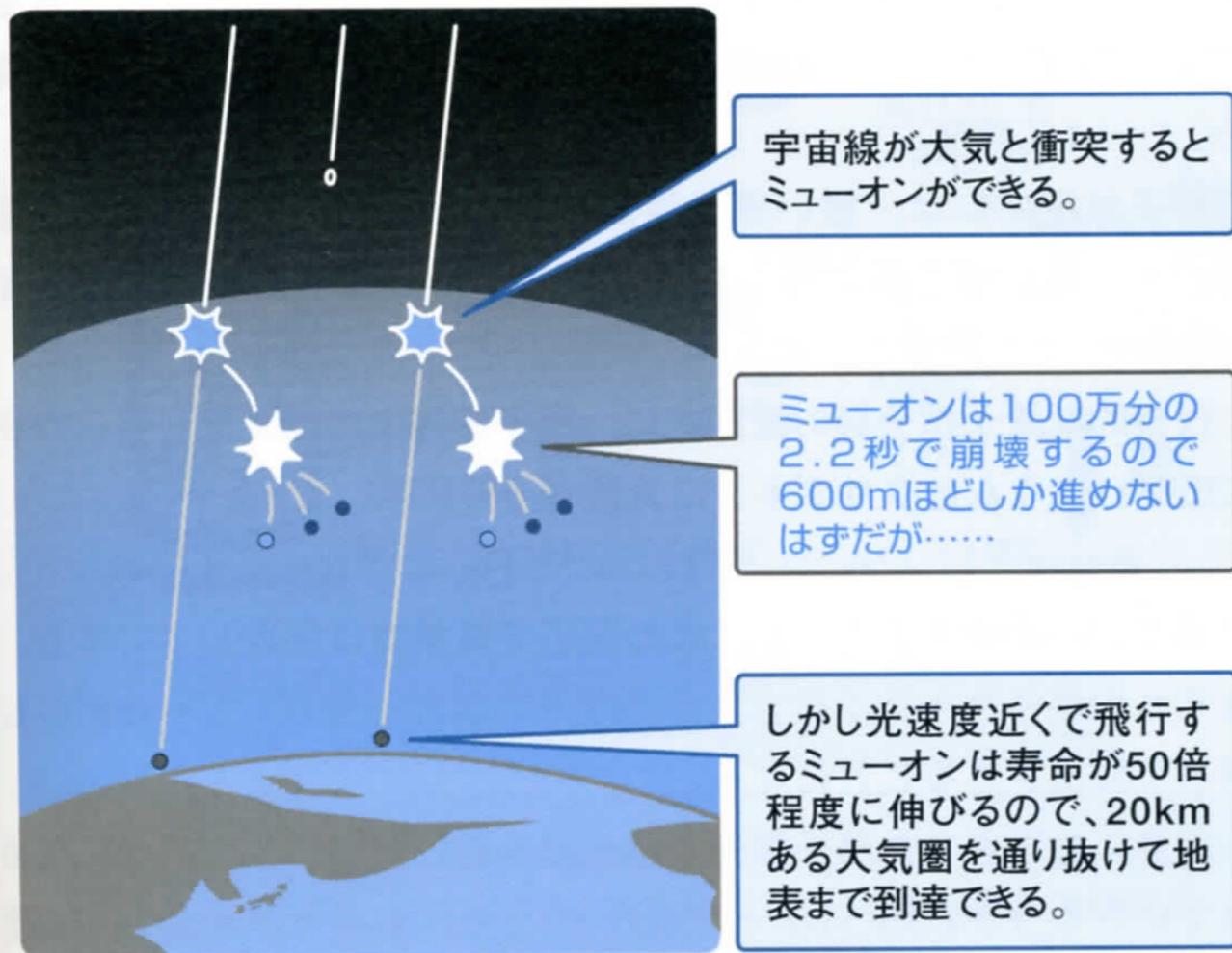
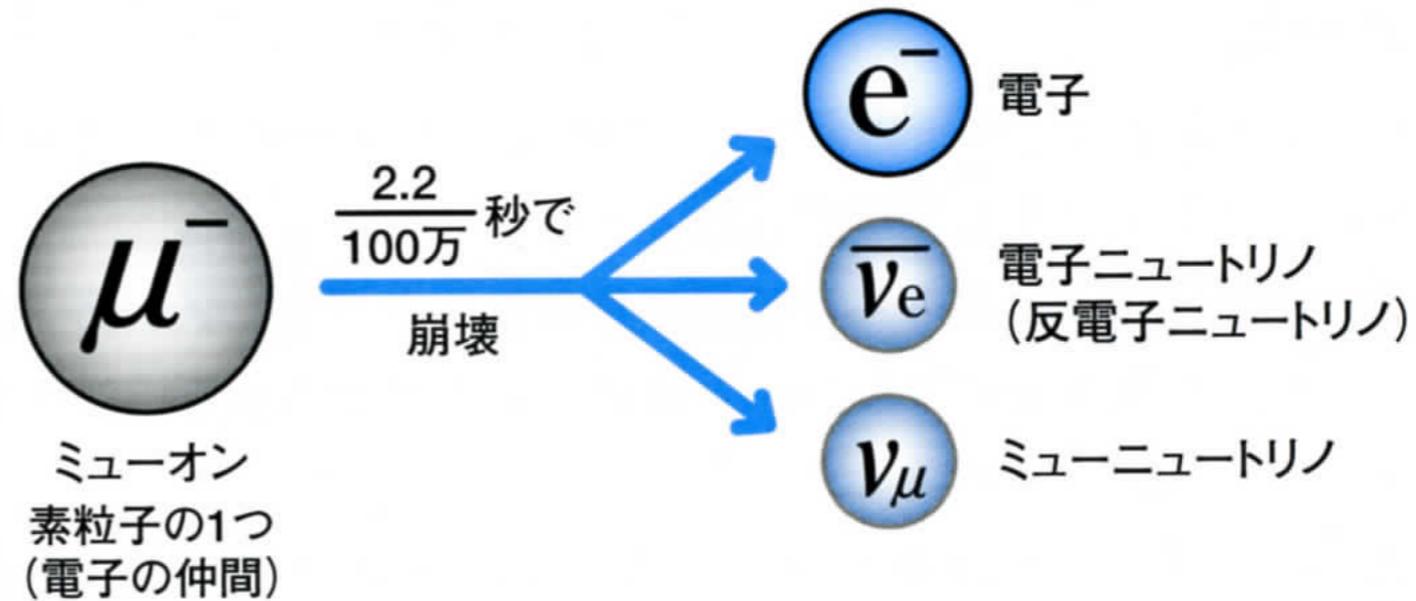
$$300 \text{ year} = \int_0^{3 \text{ year}} \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} dt \implies v = 0.9999499c$$

竜宮城は光速の99.995%で動いていた。

未来へ行くタイムマシンは実現可能！

2. 特殊相対性理論：光速に近いときの力学

素粒子の寿命は確かに延びている！



光円錐と因果律

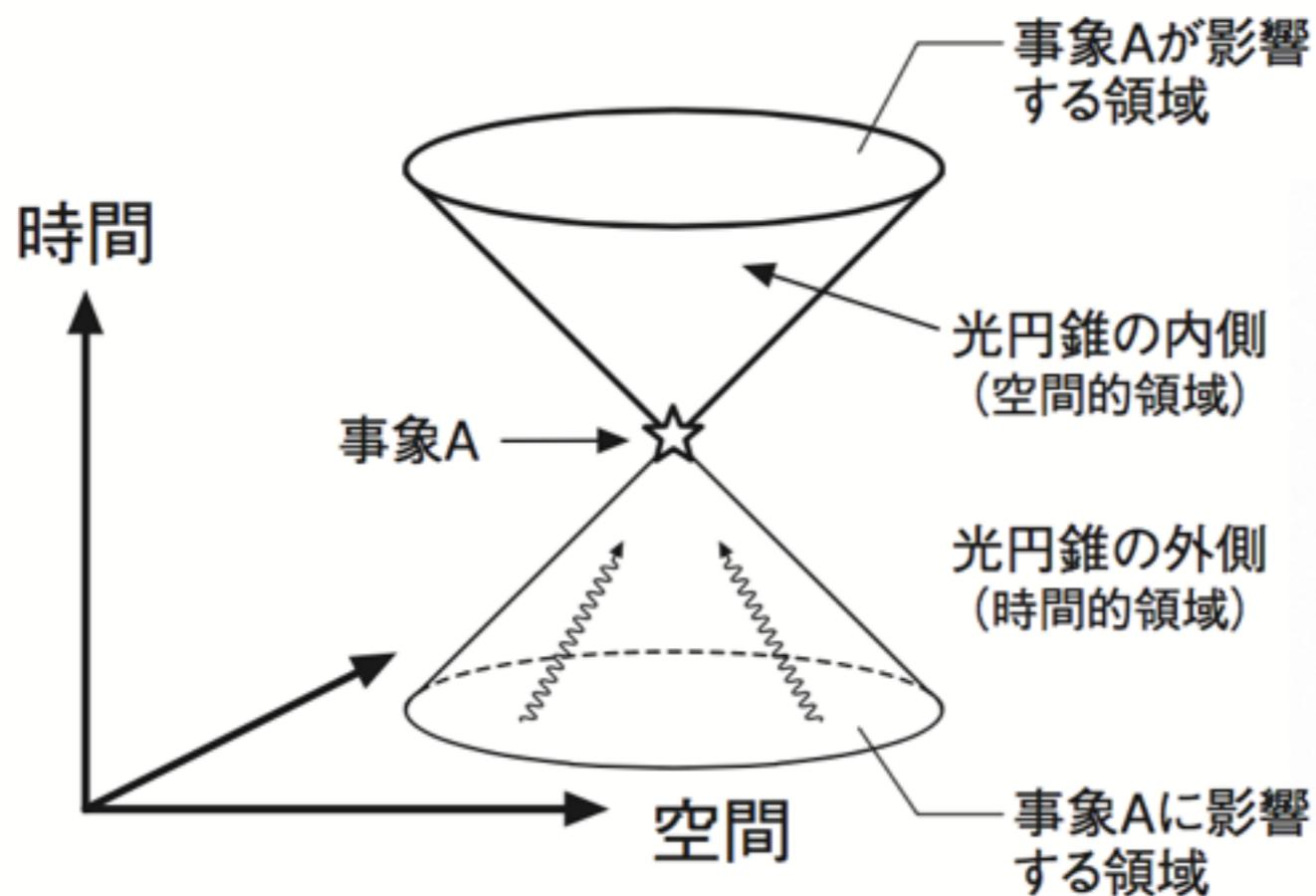


図 3.8 (左) 4次元時空は図にすることが難しいので、空間を2次元、時間を1次元にして図を描く。時間軸が縦である。光の伝わる経路はある点から円錐状に広がる。この円錐内であれば、情報が伝達可能な領域（因果関係があり得る空間的領域）、円錐より外側は情報伝達があり得ない領域（時間的領域）である。図を過去に向かって見れば、ある1点に過去からの情報がどこまで影響しているかも同様にわかる。(右) 世界物理年（2005年）のロゴは、ミンコフスキー時空の光円錐の図だった。

いよいよ

一般相対性理論

General Relativity

一般相対性理論は、重力の理論。
重い天体は、時空を曲げる。

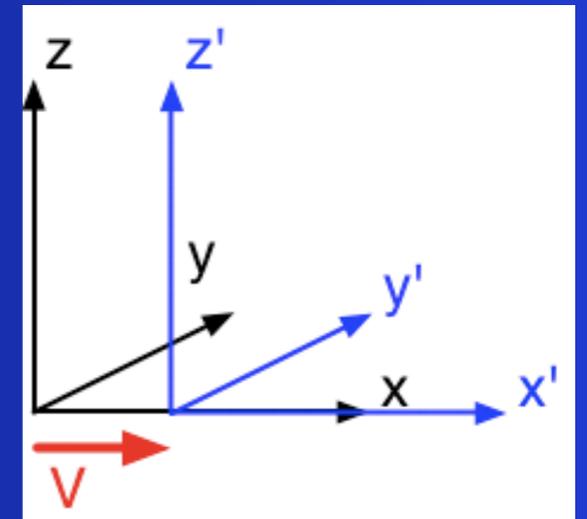
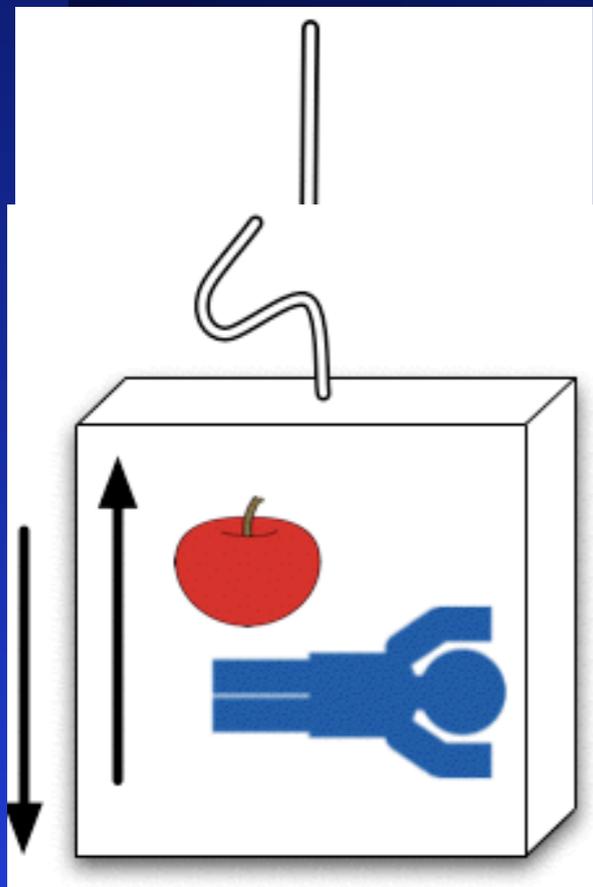
一般相対性理論【等価原理】

★ 特殊相対性理論は、加速運動する座標系を取り扱うことはできなかった。

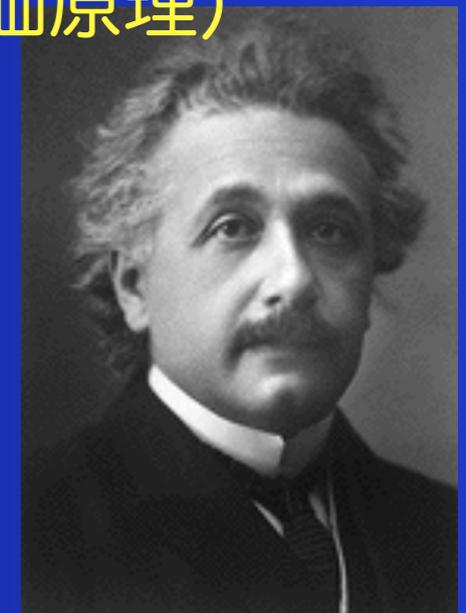
★ 加速度とは何か？

エレベータの思考実験

「重力加速度は、自由落下しているエレベータでは相殺されてしまう」
= 加速度は局所的に消去可能（等価原理）

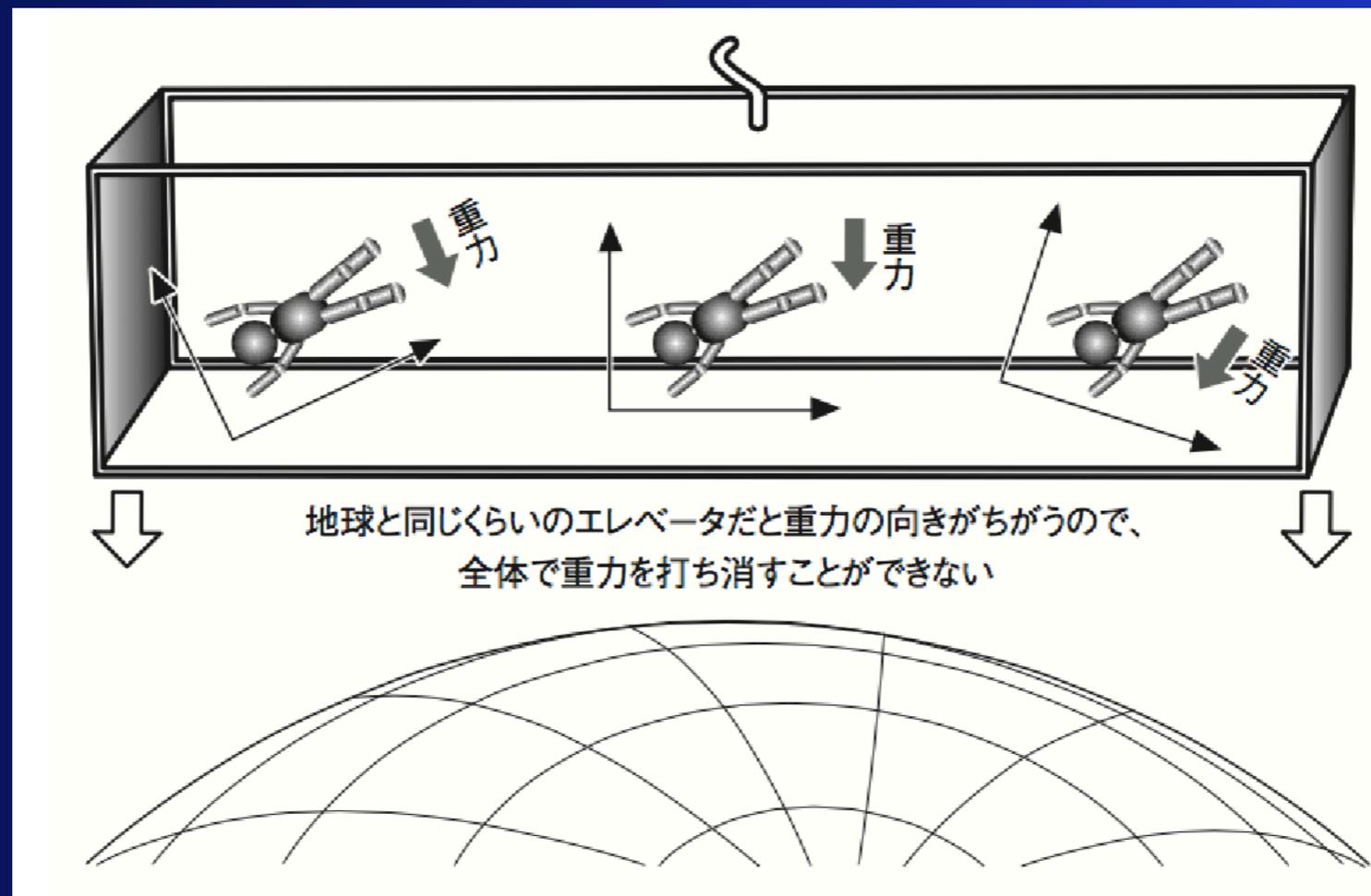


「生涯で最もすばらしいアイデア」



一般相対性理論【重力の正体】

「重力加速度は、自由落下しているエレベータでは相殺する」
= 加速度は局所的に消去可能（等価原理）



= 重力は、大局的には消去できない。

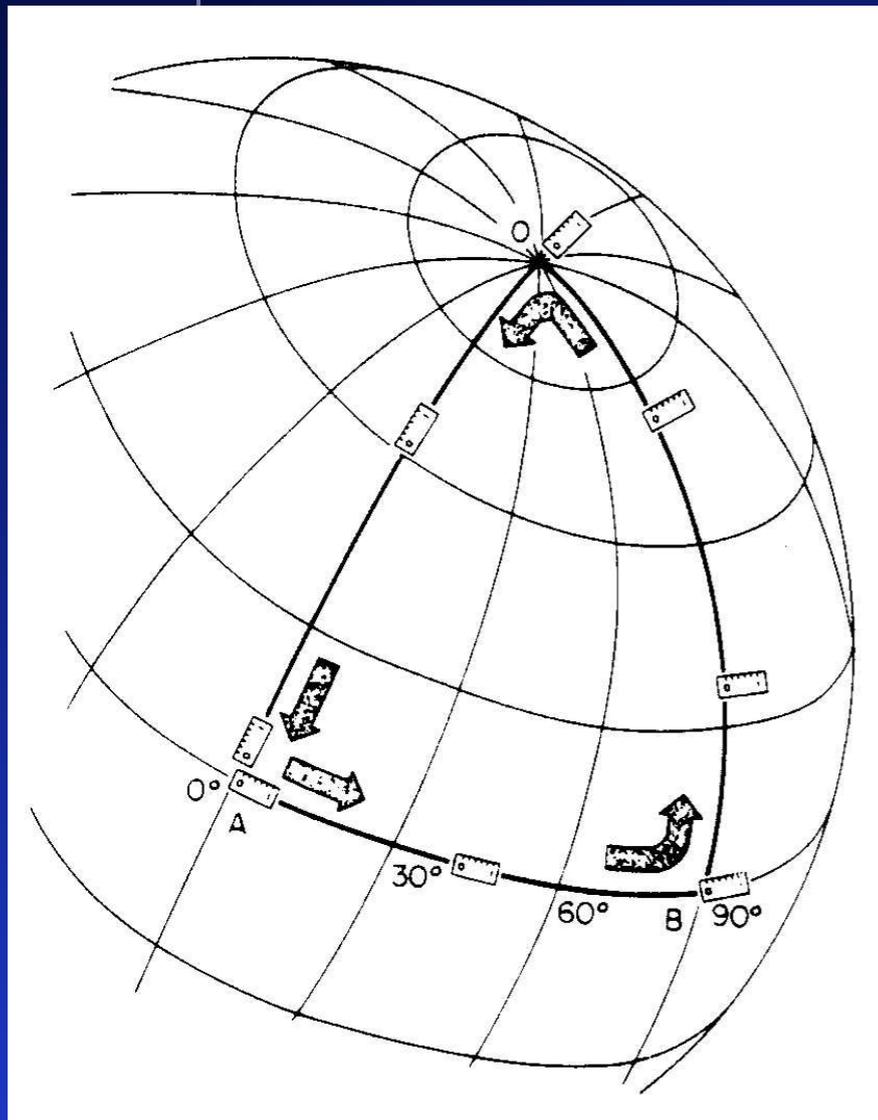
= 重力の正体は、時空のもつ曲がり具合である。

曲がった時空の幾何学 = 「一般相対性理論」

一般相対性理論【計量 metric】

曲がった時空の幾何学 = リーマン幾何学

4次元距離を一般化した「計量(metric)」.



$$ds^2 = \sum_{\mu=0}^3 \sum_{\nu=0}^3 g_{\mu\nu}(x) dx^\mu dx^\nu = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} g_{tt} & g_{tx} & g_{ty} & g_{tz} \\ & g_{xx} & g_{xy} & g_{xz} \\ & & g_{yy} & g_{yz} \\ sym. & & & g_{zz} \end{pmatrix}$$

平らな時空(flat spacetime)では,

$$\begin{aligned} ds^2 &= -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 \\ &= -c^2 dt^2 + dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2) \end{aligned}$$

一般相対性理論【計量 metric】

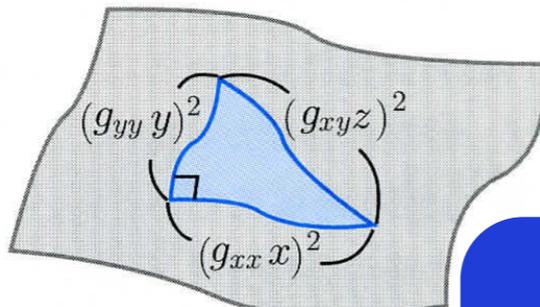
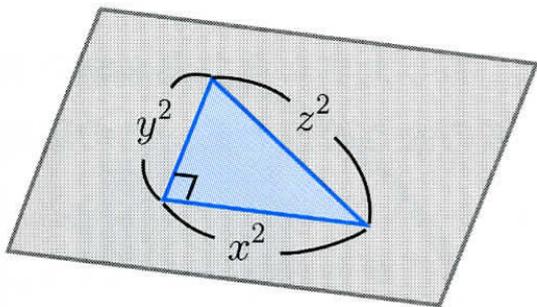
曲がった時空の幾何学 = リーマン幾何学

4次元距離を一般化した「計量(metric)」.

時空の曲がりを表す計量 $g_{\mu\nu}$

平らな面ではピタゴラスの定理が成り立つ。

曲がった空間でも成立するために計量関数で調整する。



$$x^2 + y^2 - z^2 = 0$$

$$(g_{xx}x)^2 + (g_{yy}y)^2 - (g_{xyz})^2 = 0$$

このように、曲がり具合は関数 $g_{\mu\nu}$ に押し付けて表すことができる。アインシュタイン方程式は、3次元空間+時間の4次元の曲がり $g_{\mu\nu}$ を解く方程式である。

$$ds^2 = \sum_{\mu=0}^3 \sum_{\nu=0}^3 g_{\mu\nu}(x) dx^\mu dx^\nu = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

$$\begin{pmatrix} g_{tt} & g_{tx} & g_{ty} & g_{tz} \\ & g_{xx} & g_{xy} & g_{xz} \\ & & g_{yy} & g_{yz} \\ & & & g_{zz} \end{pmatrix}$$

物理学者は、リーマン幾何学に深入りしないほうがいいよ。

(time)では,

$$\begin{aligned} ds^2 &= -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 \\ &= -c^2 dt^2 + dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2) \end{aligned}$$



Marcel Grossmann

一般相対性理論【Einstein方程式】

重力場の方程式 (1915)

空間の曲がりかたがモノの運動を決める \Leftrightarrow モノがあると空間が曲がる

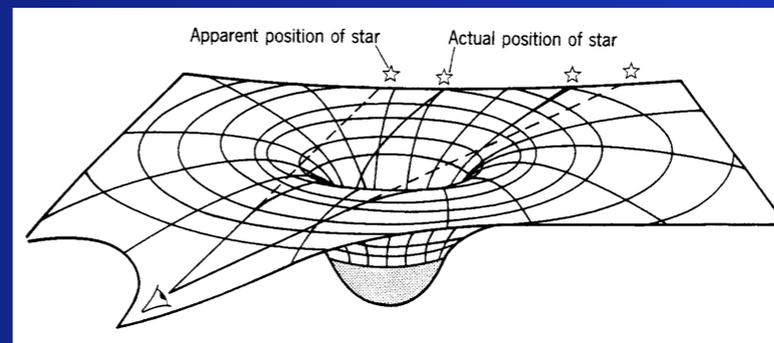
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

アインシュタイン曲率テンソル
<空間の歪み>

$$\begin{aligned}\Gamma_{\mu\nu}^{\alpha} &\equiv \frac{1}{2}g^{\alpha\beta}(\partial_{\nu}g_{\beta\mu} + \partial_{\mu}g_{\beta\nu} - \partial_{\beta}g_{\mu\nu}) \\ R^{\mu}_{\nu\alpha\beta} &\equiv \partial_{\alpha}\Gamma_{\nu\beta}^{\mu} - \partial_{\beta}\Gamma_{\nu\alpha}^{\mu} + \Gamma_{\sigma\alpha}^{\mu}\Gamma_{\nu\beta}^{\sigma} - \Gamma_{\sigma\beta}^{\mu}\Gamma_{\nu\alpha}^{\sigma} \\ R_{ab} \equiv R^{\mu}_{a\mu b} &\equiv \partial_{\mu}\Gamma_{ab}^{\mu} - \partial_b\Gamma_{a\mu}^{\mu} + \Gamma_{\nu\mu}^{\mu}\Gamma_{ab}^{\nu} - \Gamma_{\nu b}^{\mu}\Gamma_{a\mu}^{\nu} \\ R &= g^{ab}R_{ab}\end{aligned}$$

エネルギー運動量テンソル
<モノの分布>

$$T_{\mu\nu} = (\rho + p)u_{\mu}u_{\nu} + pg_{\mu\nu}$$



一般相対性理論の予言【水星の軌道】

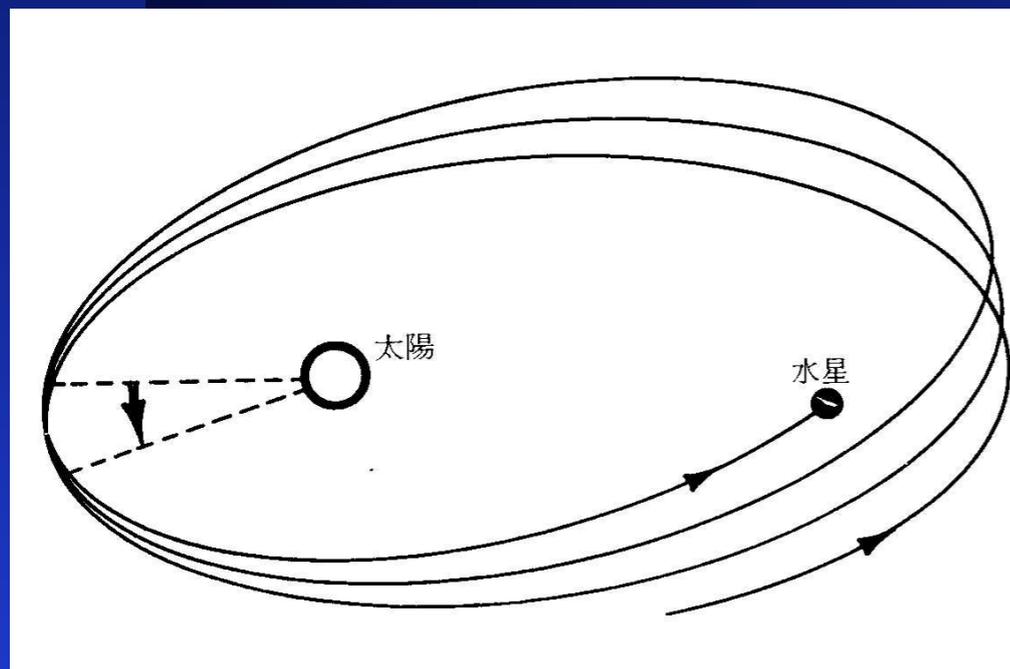
近日点移動

水星の近日点移動の問題（ルベリエ，1854）

100年で574秒ずれる。2250世紀で完全な「ばら模様」。

→→金星の影響で277秒，木星で153秒，地球で90秒，
その他の惑星で10秒分の説明が可能。

残りの43秒は？？？



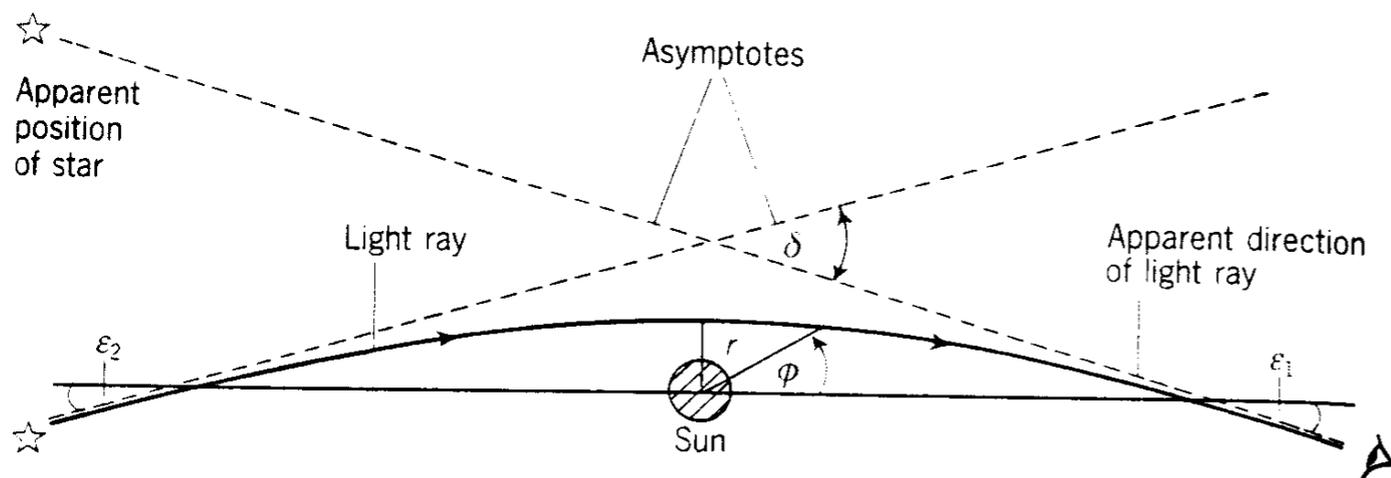
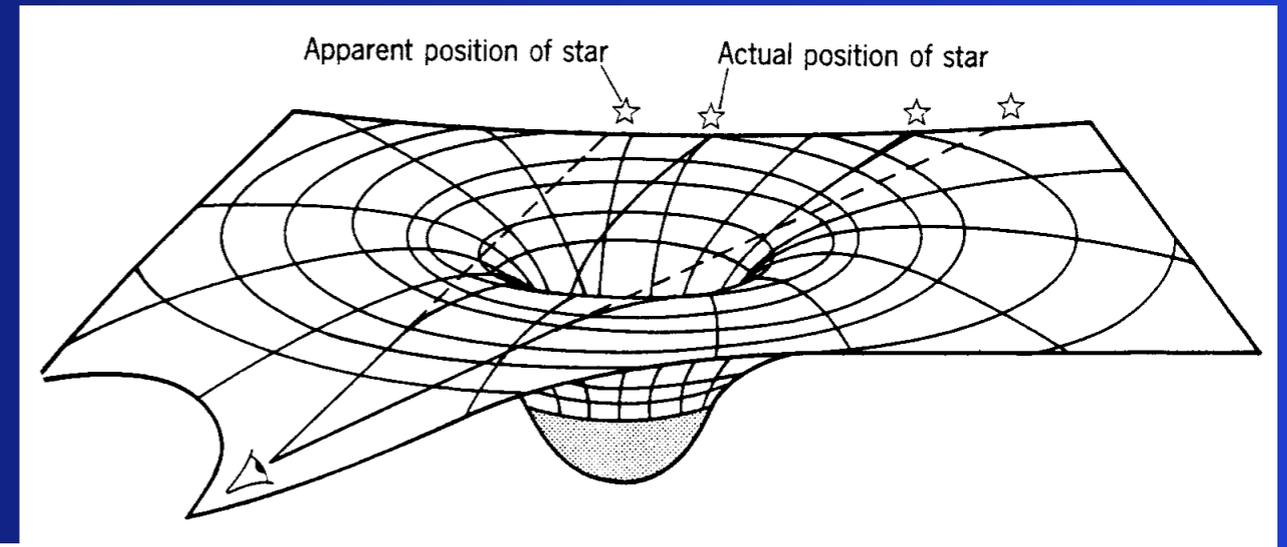
1915年，アインシュタインが，できたばかりの一般相対性理論を適用すると，「43秒の歳差運動」が出てきた。

「2-3日間，興奮のため，我を忘れてしまった」

一般相対性理論は正しい

一般相対性理論の予言【光の曲がり】

光は時空を直進するが、重い天体の周りでは、時空の歪みにより、曲がって進むことになる。



1919年、エディントンが、皆既日食を利用して、光の曲がりを確認（0.875秒角）

一般相対性理論は正しい

Taken from the 22 November 1919 edition of the Illustrated London News.

Coverage in the (more excitable) New York Times.

LIGHTS ALL ASKEW IN THE HEAVENS

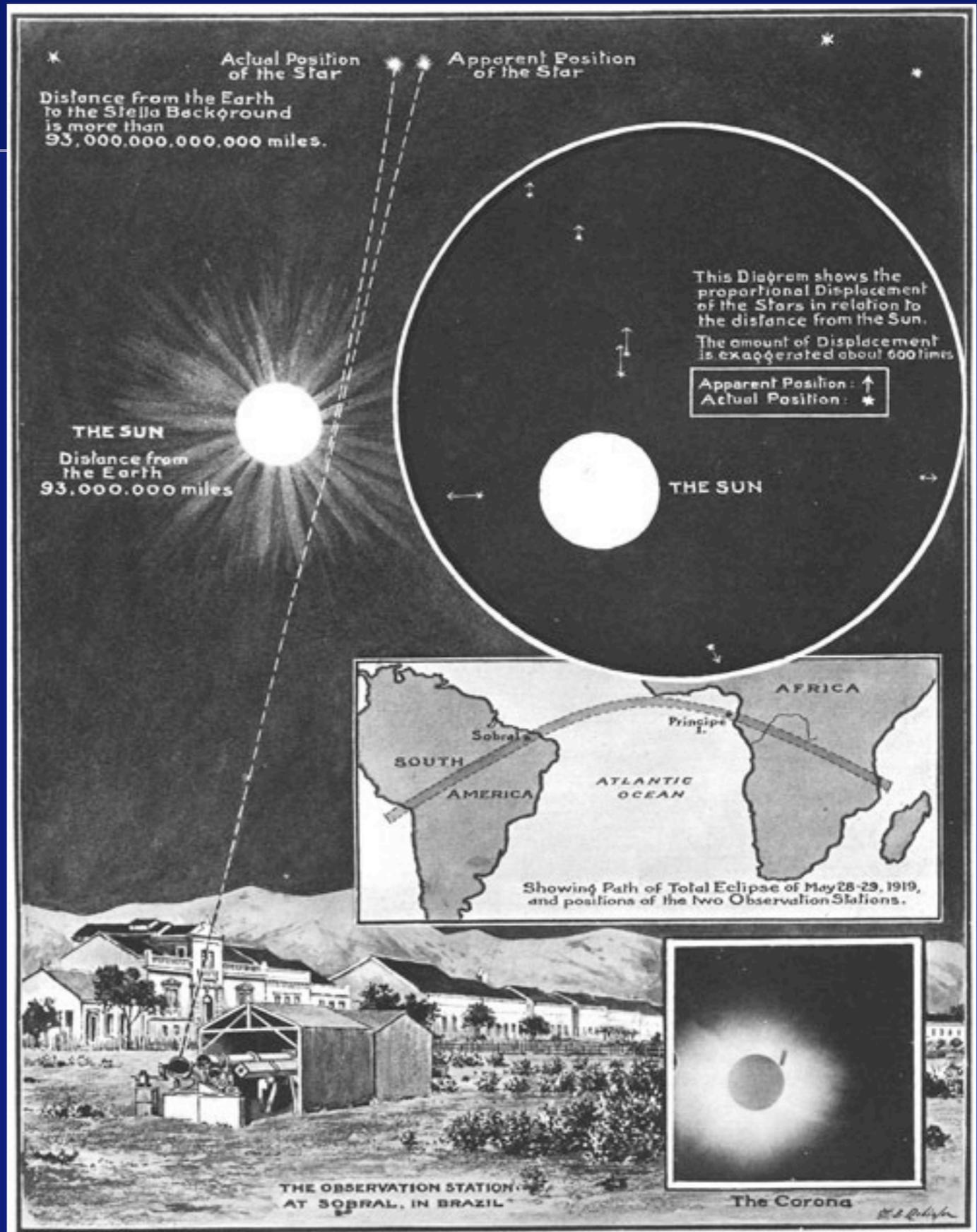
Men of Science More or Less
Agog Over Results of Eclipse
Observations.

EINSTEIN THEORY TRIUMPHS

Stars Not Where They Seemed
or Were Calculated to be,
but Nobody Need Worry.

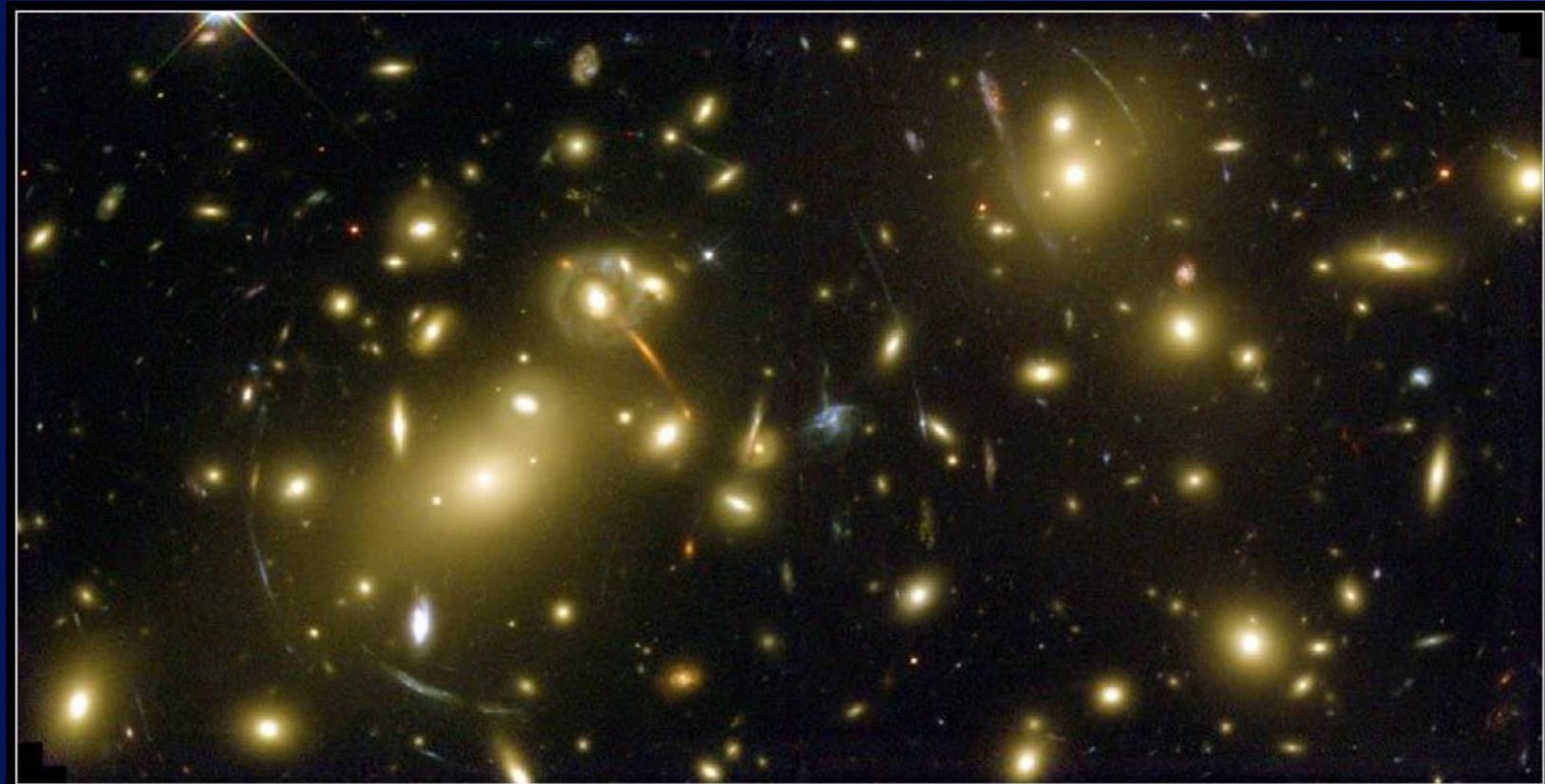
A BOOK FOR 12 WISE MEN

No More in All the World Could
Comprehend It, Said Einstein When
His Daring Publishers Accepted It.



一般相対性理論の予言【光の曲がり】

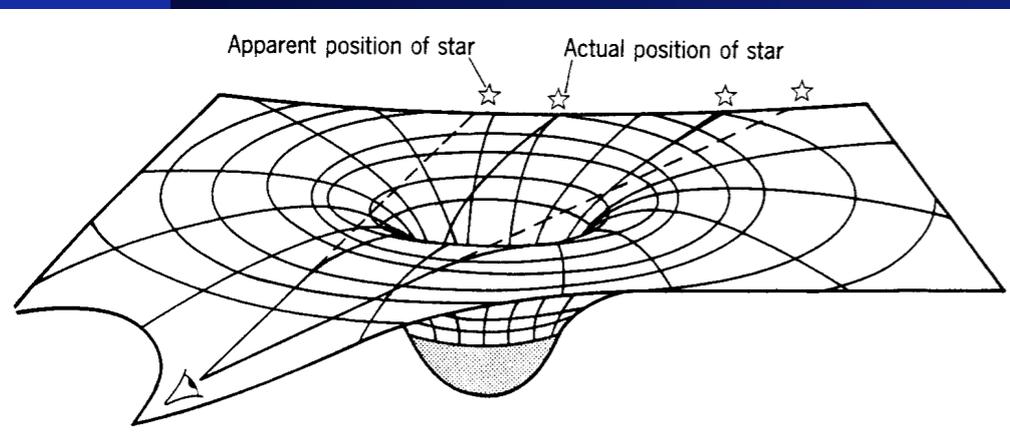
重力レンズ



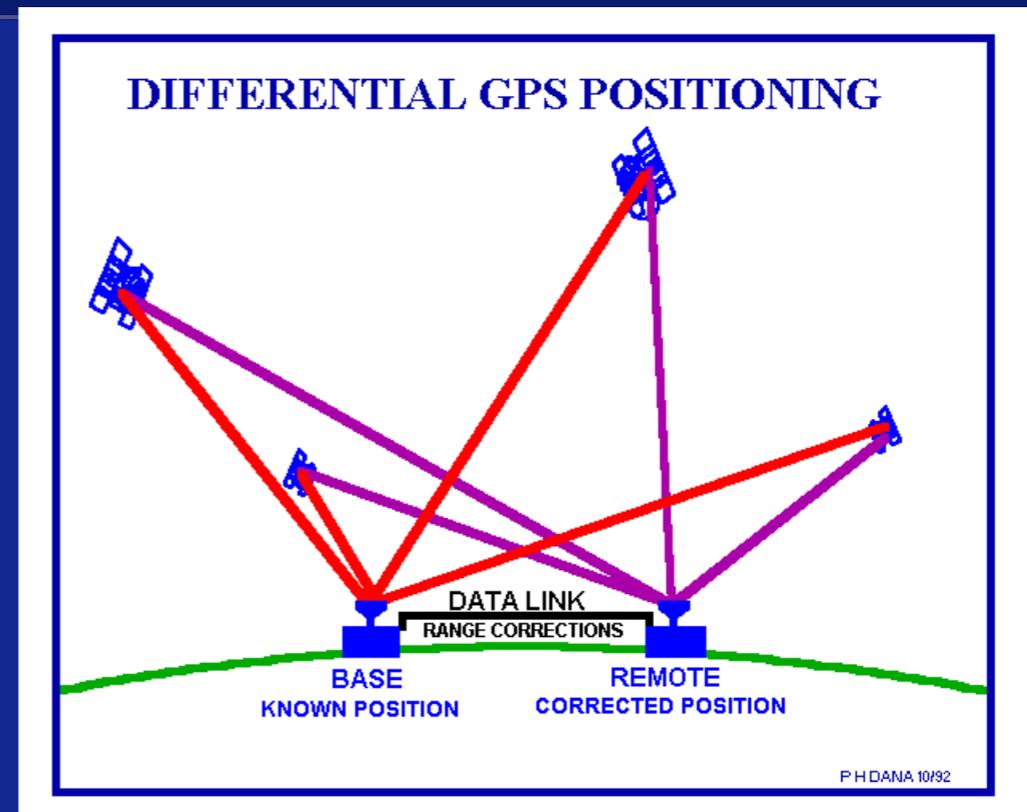
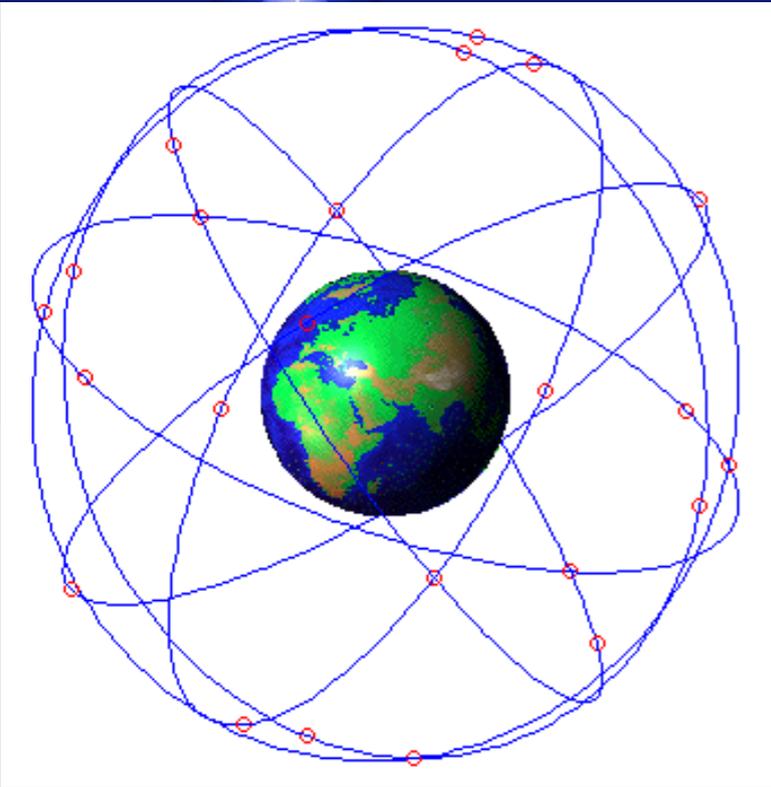
Galaxy Cluster Abell 2218

HST • WFPC2

NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI, ST-ECF) • STScI-PRC00-08



一般相対性理論の予言【GPS】



正確な位置と時刻の情報を含んだ電波で、

3角測量→精度±15m

高速飛行の**特殊相対論効果**と

地球重力の**一般相対論効果**

⇒1日につき、 38×10^{-6} 秒ずつ衛星の

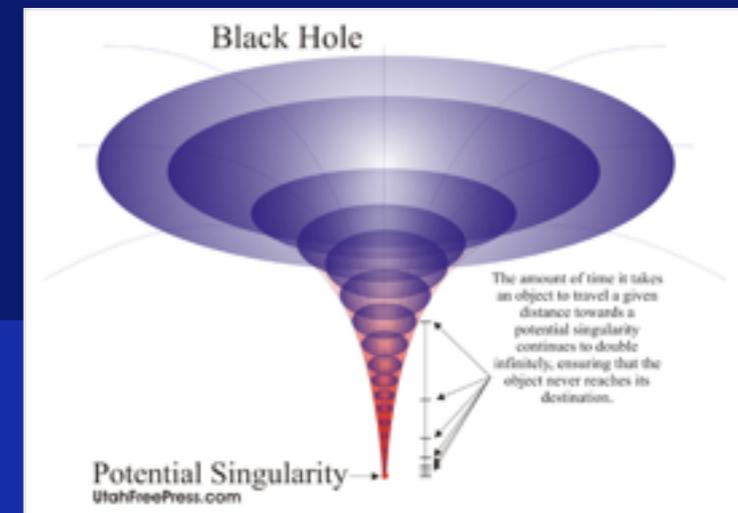
時計を遅らせる必要あり



一般相対性理論は正しい

ブラックホール

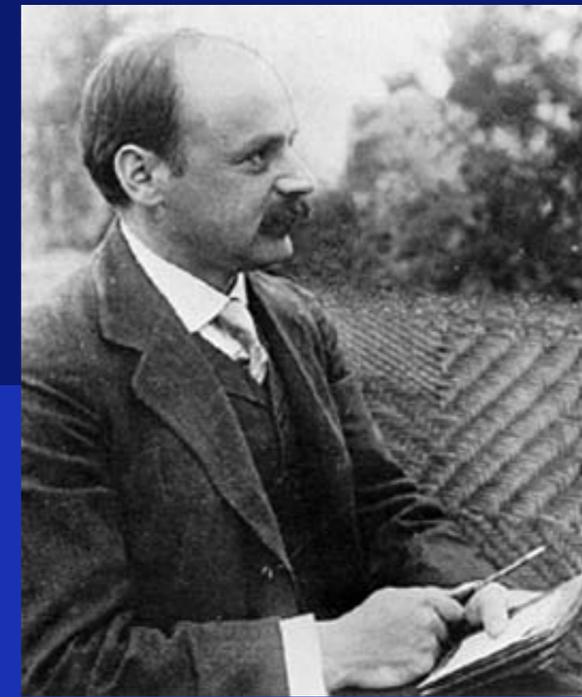
Black-hole



まず、方程式を解いたのは、シュバルツシルドだった。

アインシュタインは信じなかったが、
この答えは、ブラックホールを意味していた。

アインシュタイン方程式の解 【シュワルツシルド解】



Schwarzschild (1916)
球対称, 真空での方程式の厳密解

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r} \right) c^2 dt^2 + \frac{dr^2}{1 - \frac{2GM}{c^2 r}} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2)$$

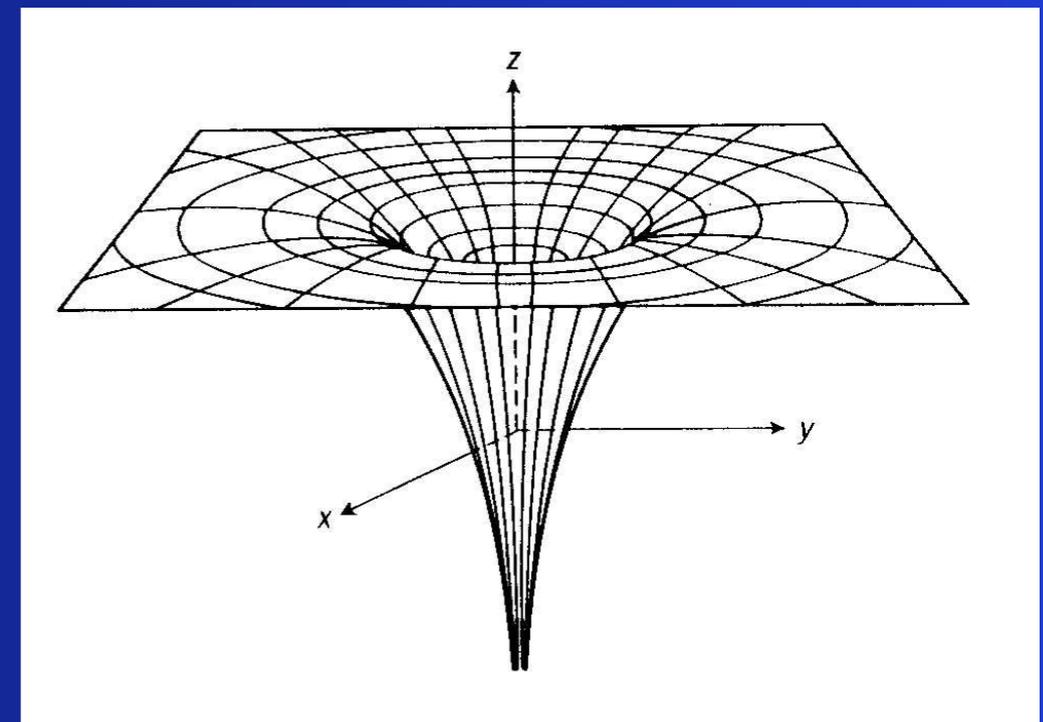
困ったことに, ……

$r=0$ で特異点

⇒ 今でも困ってる

$r=2GM/c^2$ でも特異点

⇒ ブラックホールの境界

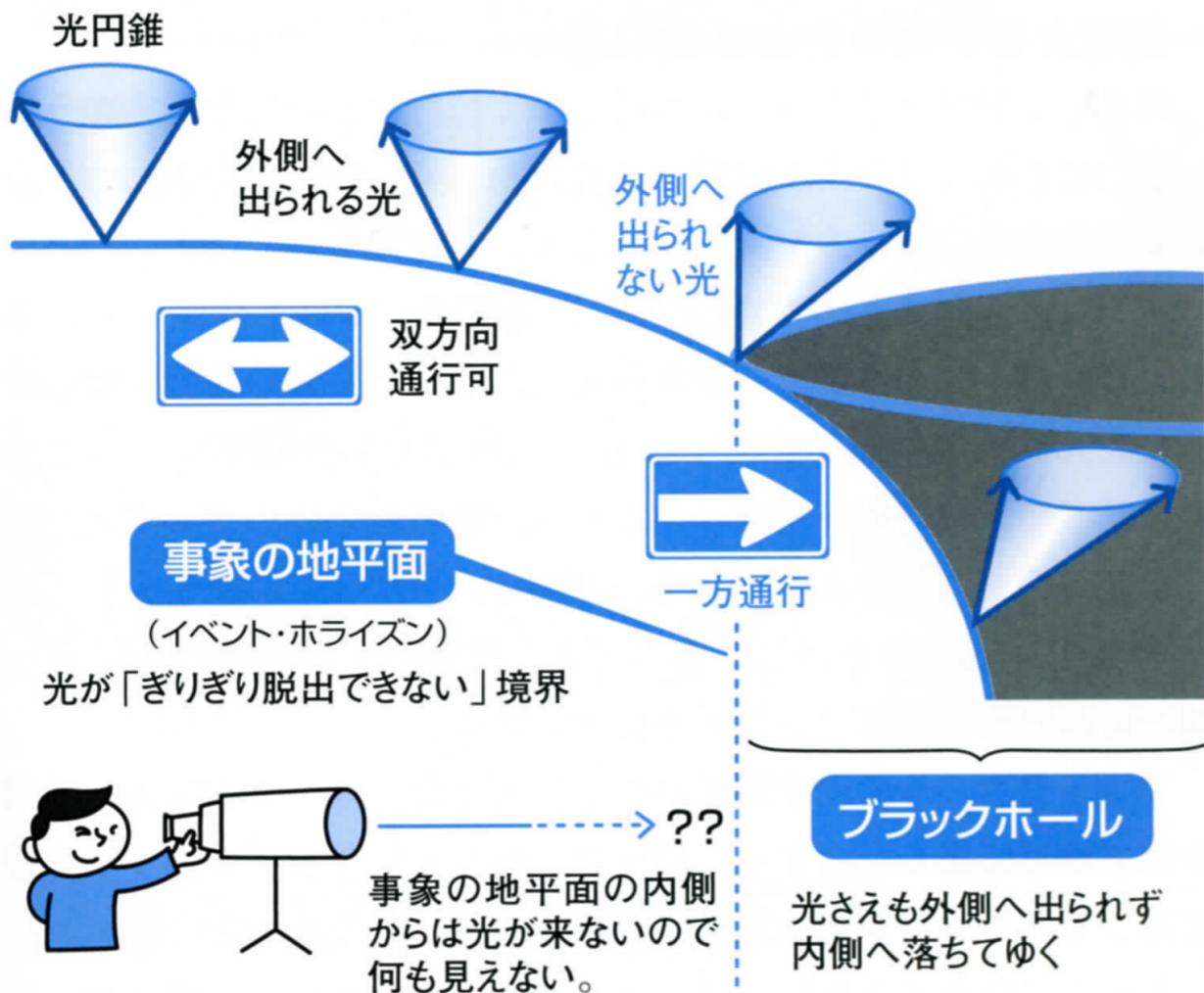


ブラックホール

= 重力が強すぎて、光さえも出られない天体

= 因果的に隔離される領域 **境界 = 地平面 (ホライズン)**

ブラックホールの事象の地平面



Newton力学でも偶然同じ値が出てくる

$$-\frac{GMm}{R} + \frac{1}{2}mv^2 = -\frac{GMm}{\infty} + \frac{1}{2}mv^2 > 0$$

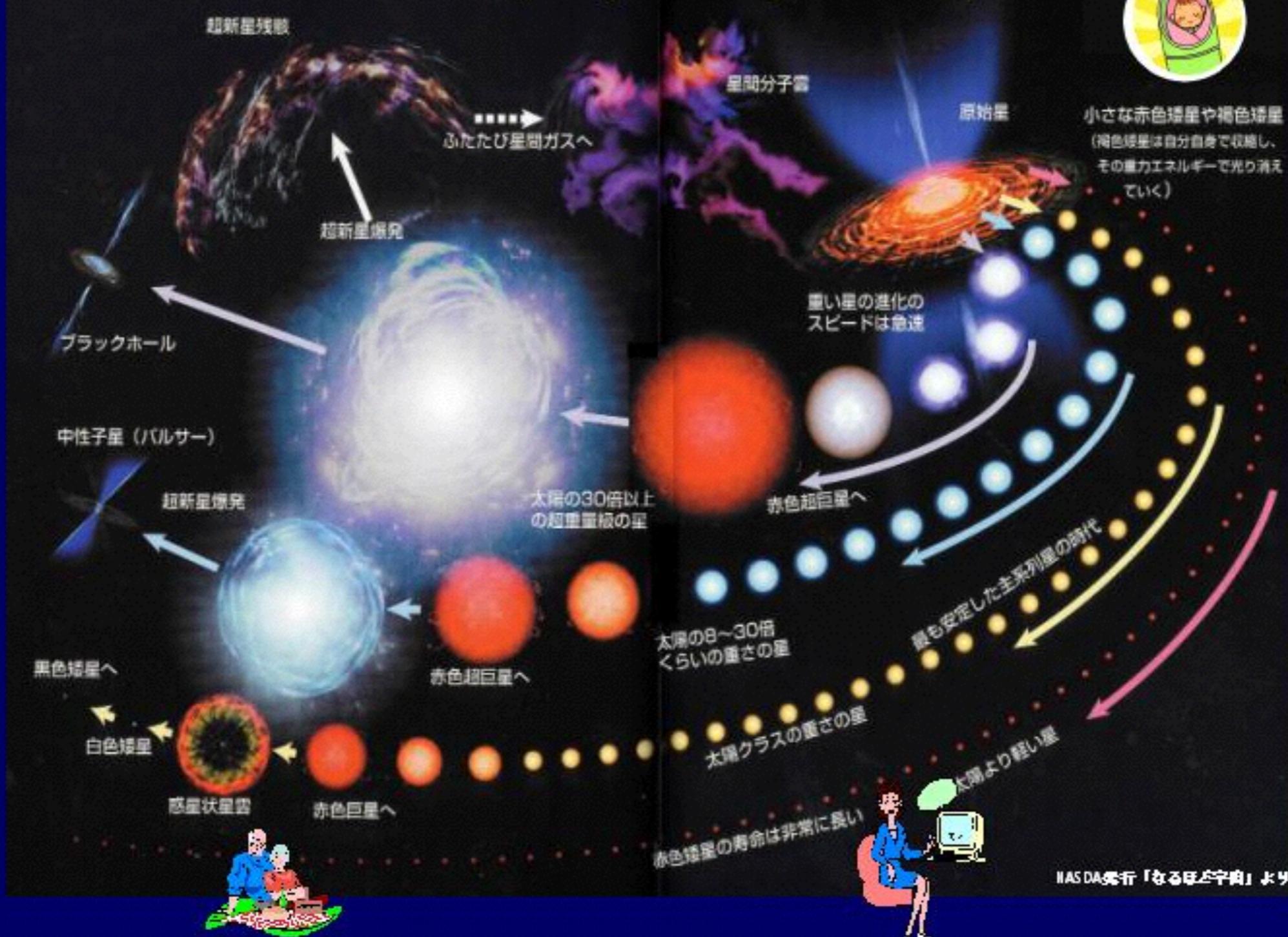
$$R < \frac{2GM}{c^2}$$

$$r = \frac{2GM}{c^2}$$

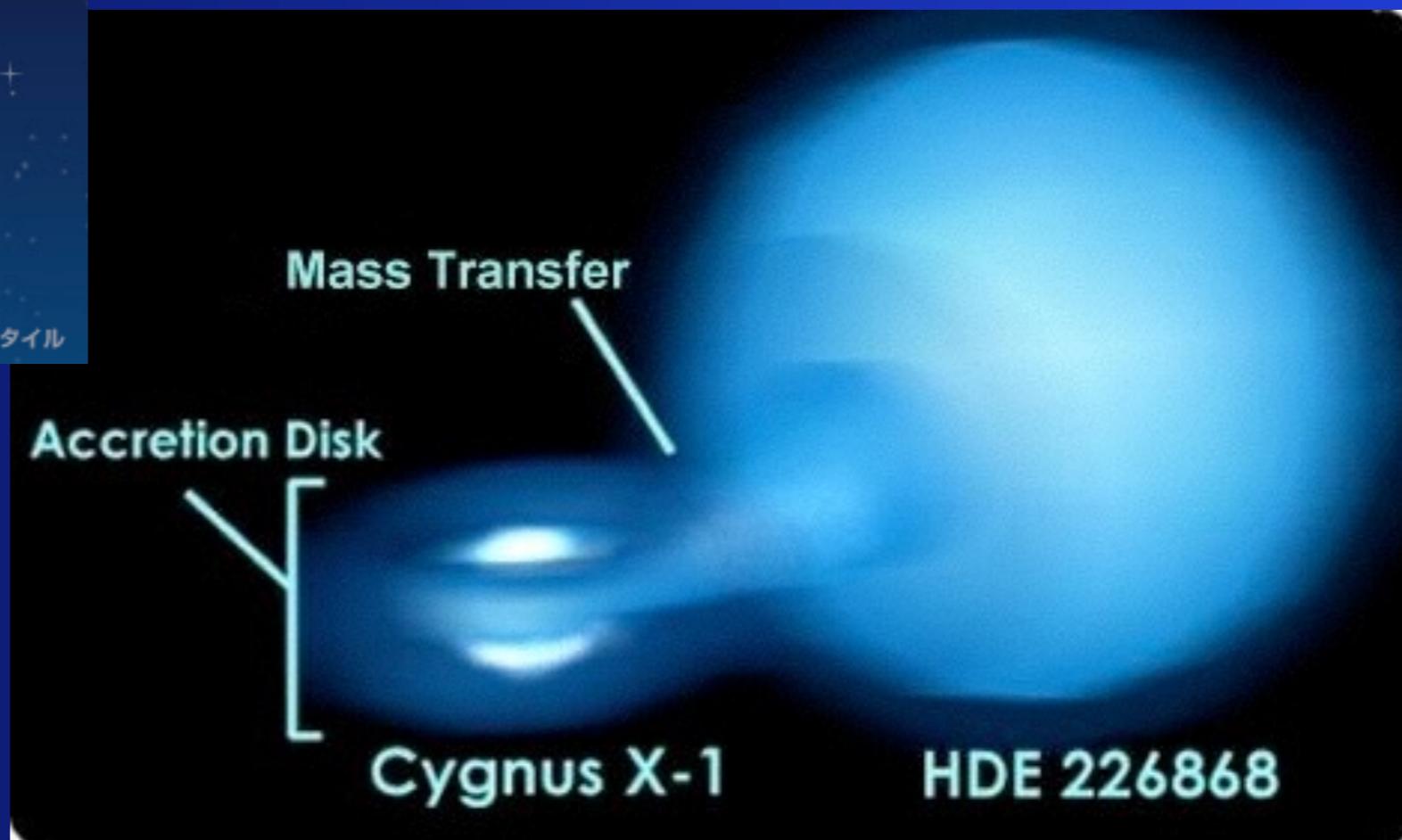
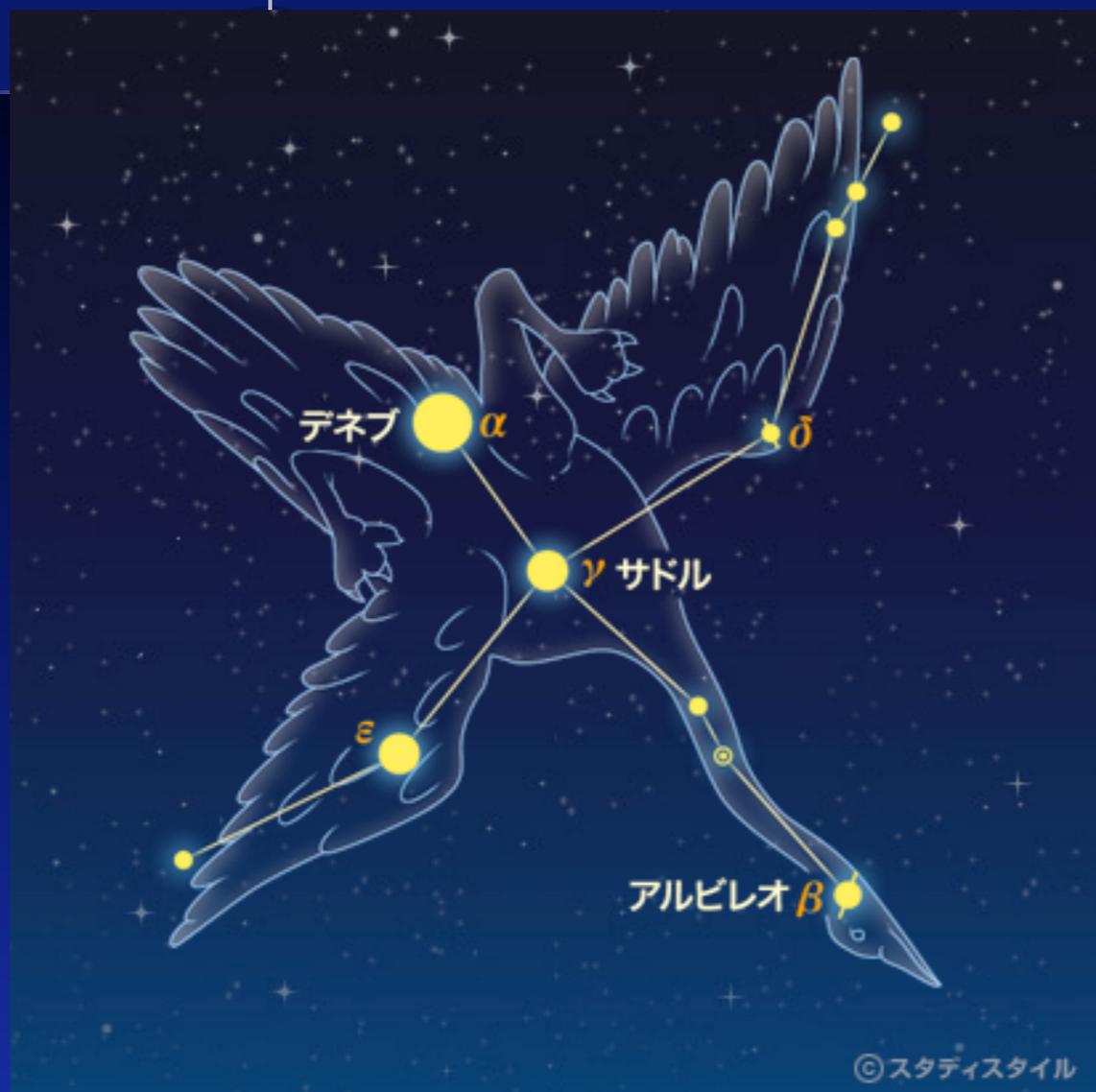
太陽なら2Km, 地球なら0.9cm

重い星が燃え尽きるとブラックホールに

星の一生 ～100億年の壮絶なドラマ～



はくちょう座 X-1はブラックホール



銀河系の中心にも巨大ブラックホール

THE MILKY WAY

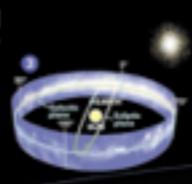
NATIONAL GEOGRAPHIC

How far galaxy of Earth, the Milky Way is a spiral-shaped system of a few hundred billion stars. Bright regions of recently formed stars highlight its arms, while older stars replete or edged their outer layers as beautiful planetary nebulas, then fade away and die. A thick swarm of orange and red stars marks the galactic bulge, encapsulating the star-packed galactic center. At its core may lie a black hole, a region so dense that not even light can escape its gravitational pull. All objects in the Milky Way orbit the galactic center, much like planets in Earth's solar system revolve around the sun. But the scale is staggering: Light from a star at one edge of the galaxy takes about 100,000 years to reach the opposite side.



GUIDE TO THE GALAXY

- For beyond the galactic disk, yet still in its gravity, lone stars and globular clusters orbit the galaxy's core. Regions of dark matter—seen but felt through its gravitational effects—surround the core.
- Thin clouds of interstellar dust block much of our sight.
- As seen from the Milky Way, which from our position in the flat galactic disk appears as a fuzzy band of light, interstellar dust can be seen through the dust to reveal the galaxy's structure.
- Earth's orbit around the sun lies at a severe angle to the galactic plane.



A TURBULENT HEART

A graph based on a radio survey reveals the whirlwind structure of molecular gas in the inner part of our galaxy. Gas moving away from Earth (top half) and toward Earth (bottom half). This diagram also shows white, red, and blue.

Close-up view of energy in the Milky Way, producing shockwaves that race along magnetic field lines, illuminating molecules of stellar nebulas. Probing even deeper into the core, a radio image detects a swirl of hot gas that is falling toward what may be a black hole some 2.6 million times as massive as the sun.

This computer-generated image of the Milky Way—our perspective of a 3-D model newly compiled for National Geographic—incorporates the actual positions of hundreds of thousands of stars and nebulas.

- Molecular star cluster
- Interstellar gas and dust
- Helix
- Spiral star region
- Molecular cloud
- Galactic bulge or core
- Galactic core region

Reference positions for galaxies, nebulas, and star clusters

© 2002 National Geographic Society

PLANETARY NEBULA NG 8

Earth's inhabitants of the Milky Way stalk nebulas and star clusters are found throughout Earth's galaxy. Even a run-of-the-mill star may eventually give birth to a nebula of surprising beauty.

Just as our sun will die in its death throes, so will the sun's progeny. One day, a dying star expanded into a red giant and then transformed into the Helix NG 8 nebula. As its outer layers

a small, hot core, which will cool and fade over time to become its stellar remnant, expands of charged particles, gases and dust in opposite directions, but outward from back-to-back engines. This expansion, created by the Helix Space Telescope, is common among stellar nebulas. Ultraviolet light from the star heats the gas and causes it to glow. One day, the gas will be blown away.

Cloud seems to have a silver lining. The Helix Nebula is a glowing cloud of gas and dust that surrounds the central star of the Milky Way, the Helix Nebula. It is a remnant of a star that once shined brightly in the night sky. These fragments are scattered throughout the Milky Way, and some are older than the sun. They provide an important record of the galaxy's evolution.



PLANETARY NEBULA NG 8

Light from the hot star is absorbed by and warms the dust, resulting in a glow. As the star's outer layers are blown away, the remaining core is exposed. The Helix Nebula is a remnant of a star that once shined brightly in the night sky. These fragments are scattered throughout the Milky Way, and some are older than the sun. They provide an important record of the galaxy's evolution.

PLANETARY NEBULA NG 8

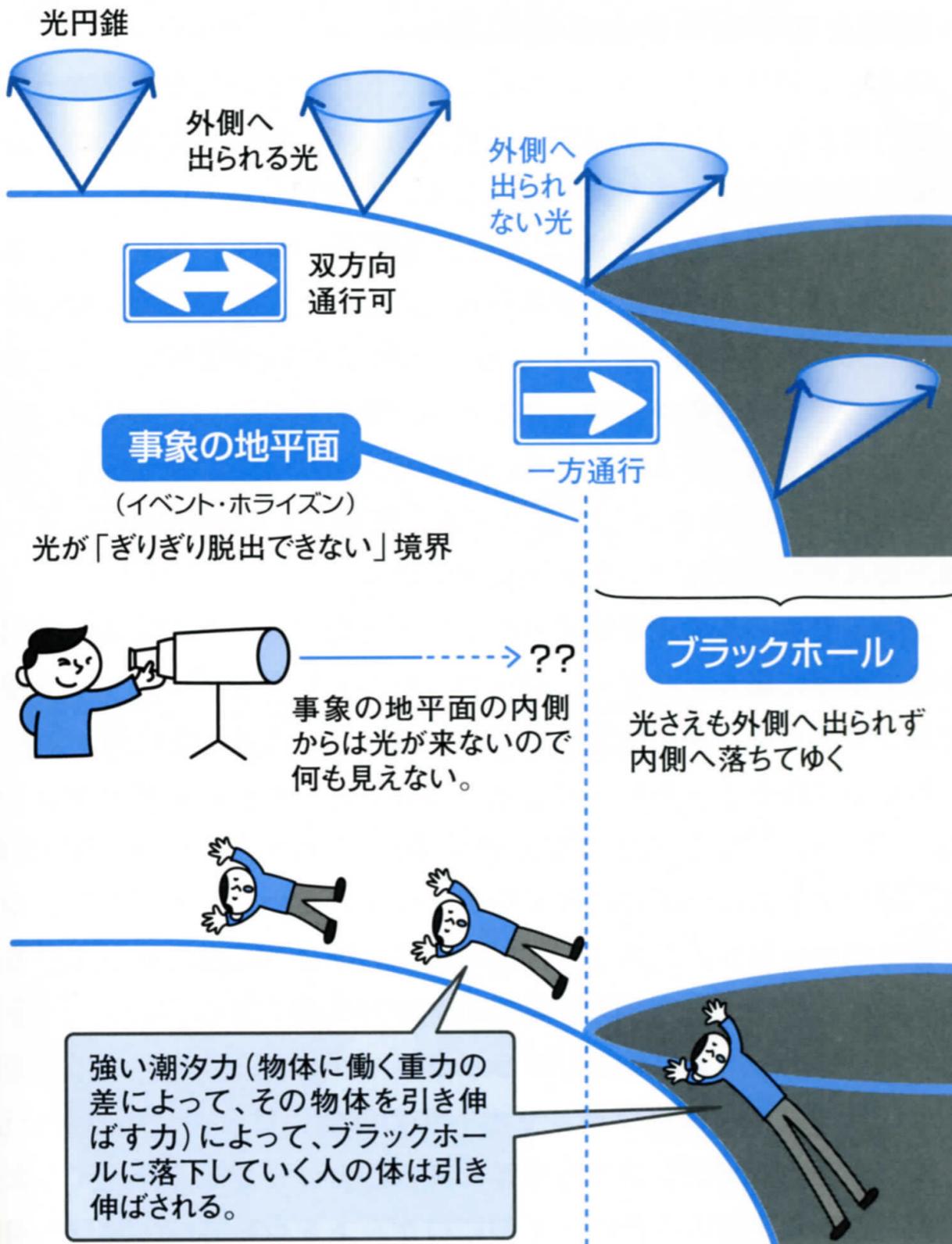
Light from the hot star is absorbed by and warms the dust, resulting in a glow. As the star's outer layers are blown away, the remaining core is exposed. The Helix Nebula is a remnant of a star that once shined brightly in the night sky. These fragments are scattered throughout the Milky Way, and some are older than the sun. They provide an important record of the galaxy's evolution.

LAGOON NEBULA

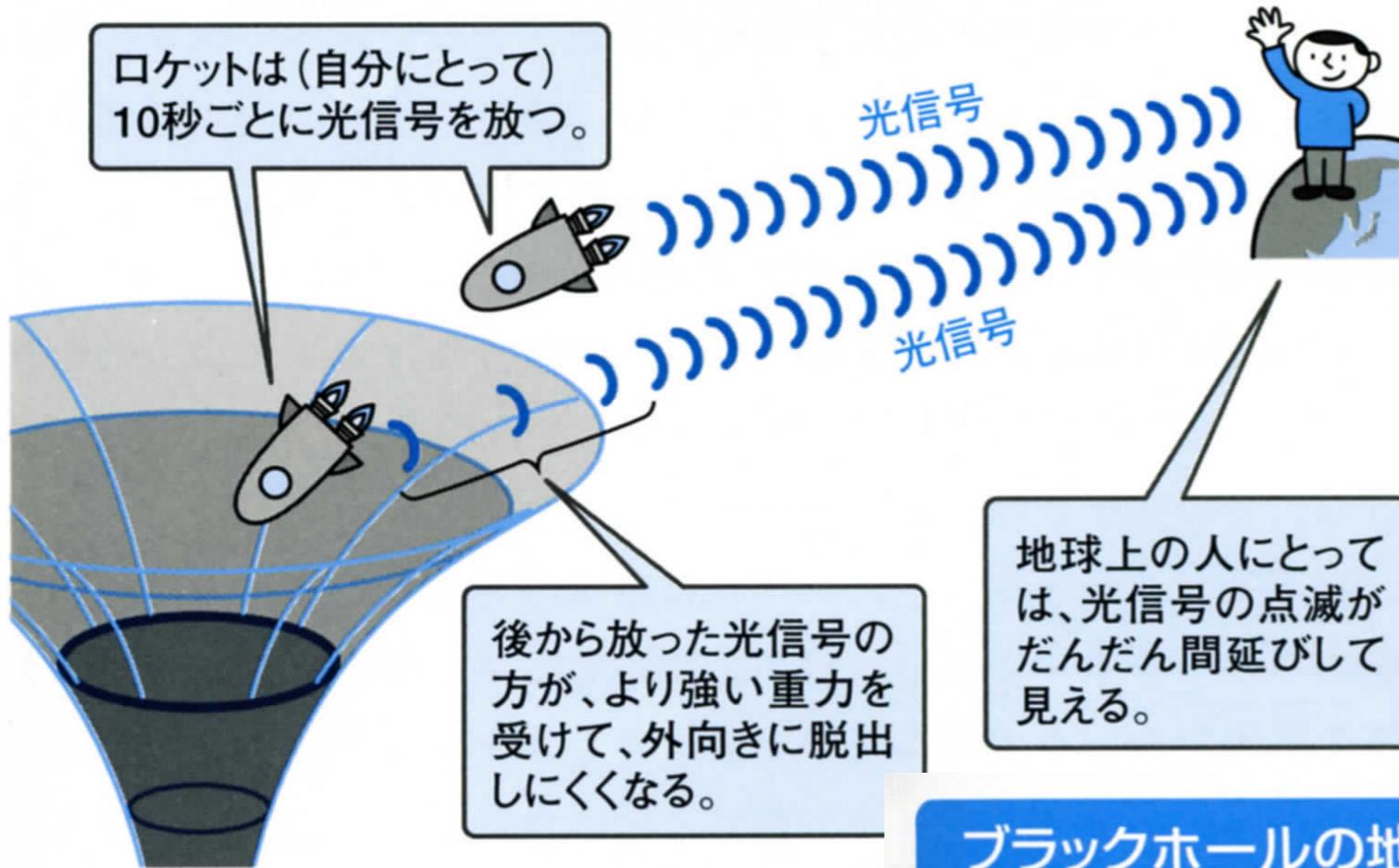
Dark, dusty, filamentary clouds of thick gas and dust surround the bright star in the Lagoon Nebula. The star's intense radiation and stellar wind create a complex, multi-lobed structure. The Lagoon Nebula is a remnant of a star that once shined brightly in the night sky. These fragments are scattered throughout the Milky Way, and some are older than the sun. They provide an important record of the galaxy's evolution.

ブラックホールで未来へ行く(1)

ブラックホールの事象の地平面

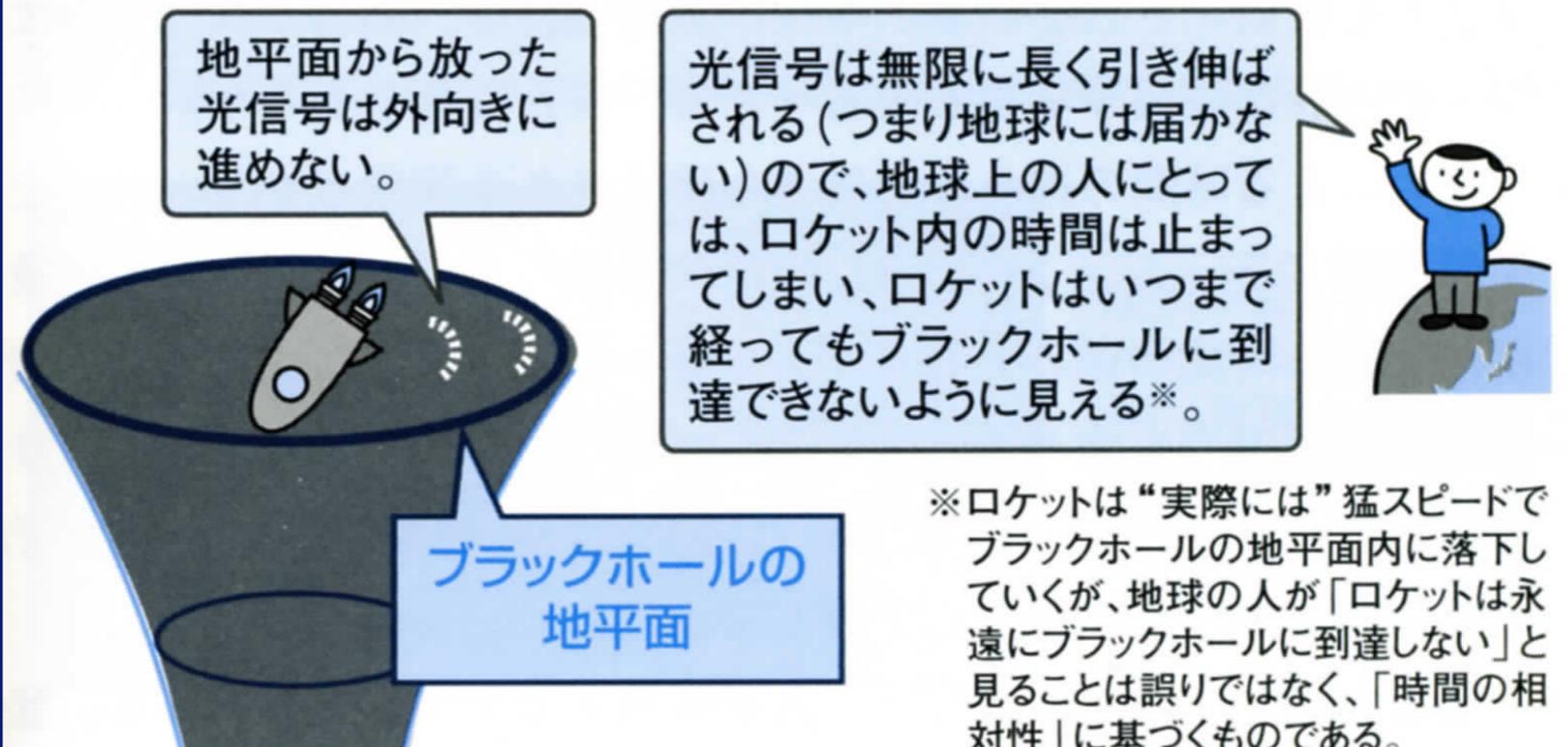


ブラックホールに近づくロケットが放つ光信号

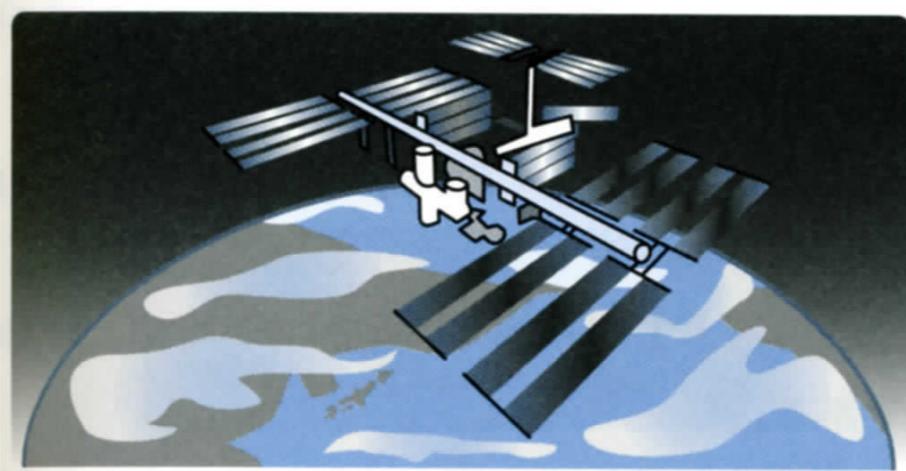
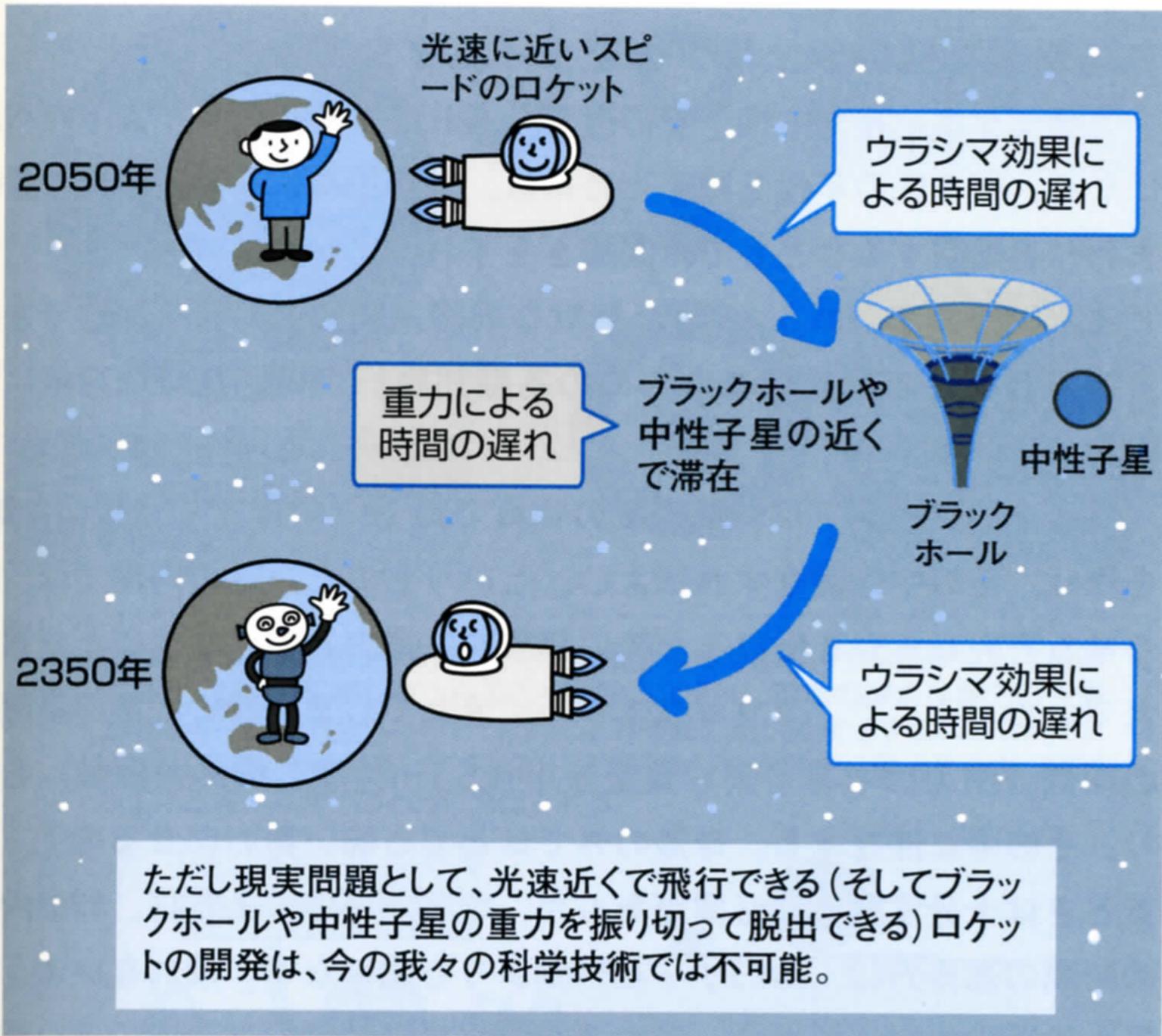


ブラックホールで未来へ行く(2)

ブラックホールの地平面から放つ光信号



ブラックホールで 未来へ行く(3)



国際宇宙ステーション (ISS) に2年間滞在すると、地球上にいた人よりも50分の1秒だけ「未来」に行けることになる。

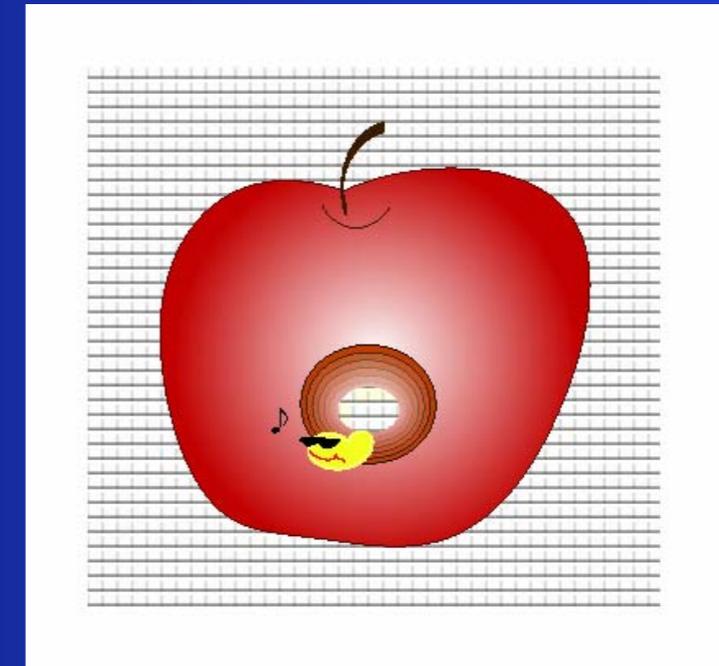
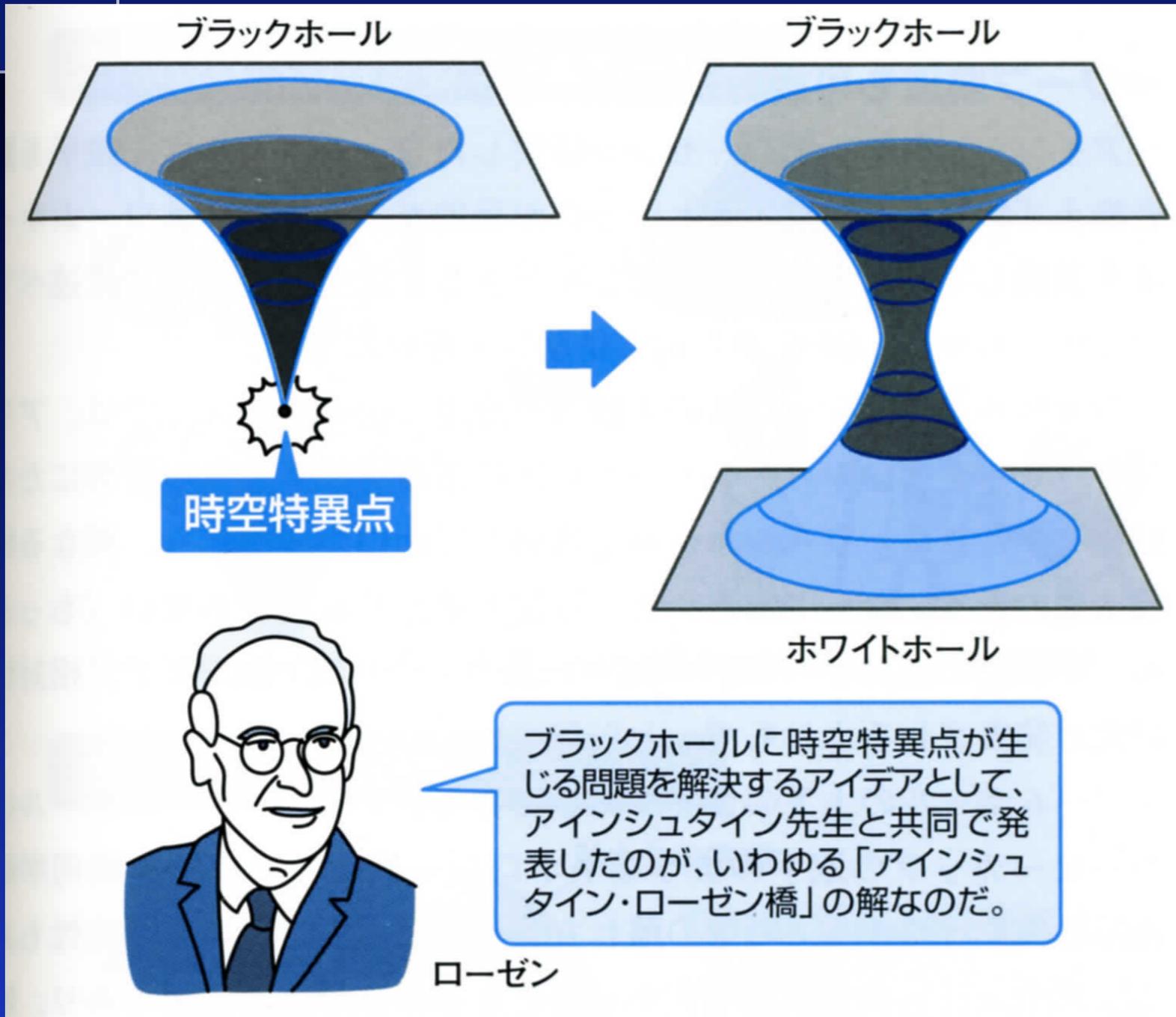
ワームホール wormhole

本当にあるのかどうか誰も知らないが、

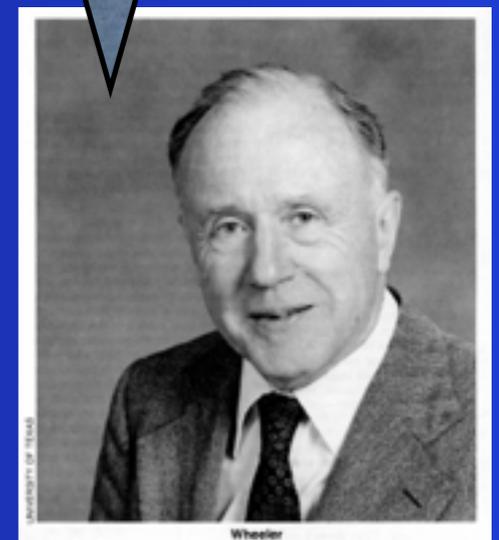
もしxxxで、さらにxxxで、さらにxxxで、さらにxxxで、
さらにxxxで、さらにxxxならば、タイムマシンができる

現在の、一般相対性理論研究の**非**中心的問題。

アインシュタイン・ローゼンブリッジ



ワームホール
と呼ぼう



ホイーラー

ワームホール?

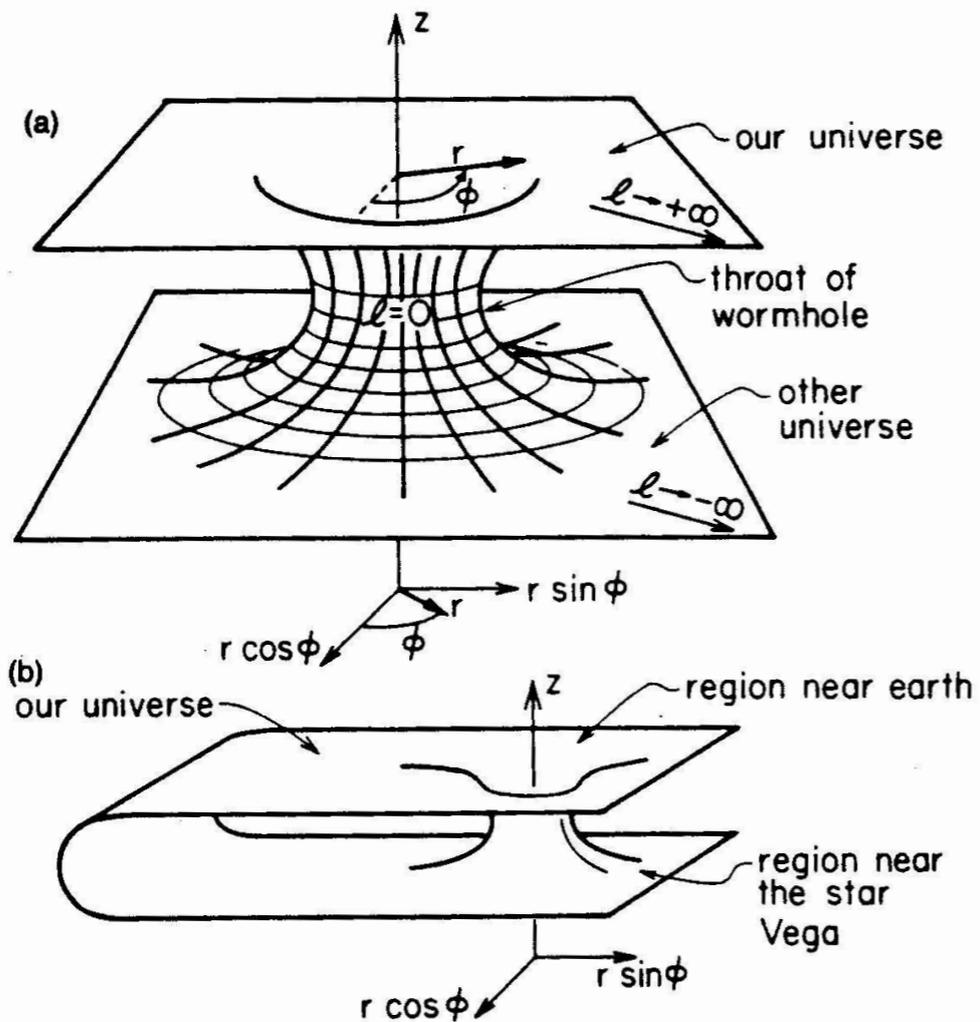
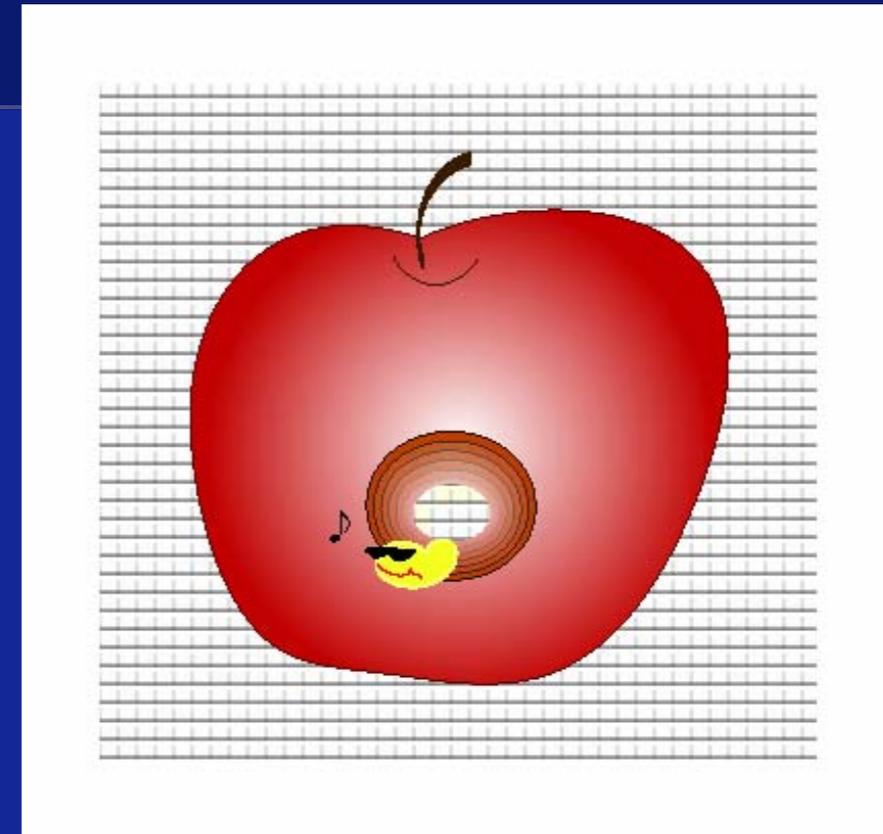


Fig. 1. (a) Embedding diagram for a wormhole that connects two different universes. (b) Embedding diagram for a wormhole that connects two distant regions of our own universe. Each diagram depicts the geometry of an equatorial ($\theta = \pi/2$) slice through space at a specific moment of time ($t = \text{const}$). These embedding diagrams are derived quickly in item (b) of Box 2, and—in a more leisurely fashion—in Sec. III C, where they are also discussed. This figure is adapted from Ref. 1, Fig. 31.5.



物理科学雑誌

parity

パリティ 2003 05

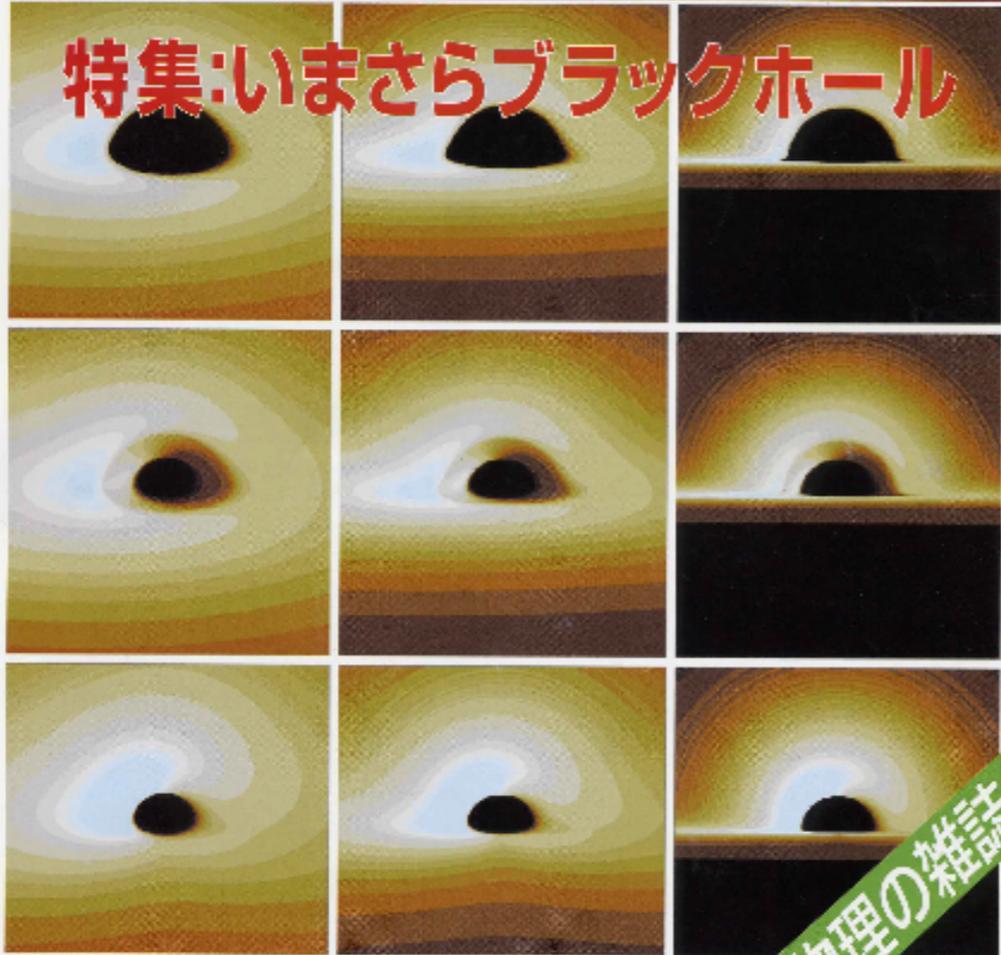
創刊号 1972年10月号
発行所 株式会社朝倉書店
〒100-0001 東京都千代田区千代田1-1-1
03-5561-1111
PHYSICS TODAY 提携

ブラックホールの誕生に迫る | ブラックホールは黒いのか

ブラックホールはどう見えるか | 明るく輝く黒い穴

ワームホールは、通過可能か? | いまこそブラックホール? | ホワイトホールの死?

特集:いまさらブラックホール



MARUZEN

物理の雑誌

物理科学雑誌

2003 05

パリティ

parity

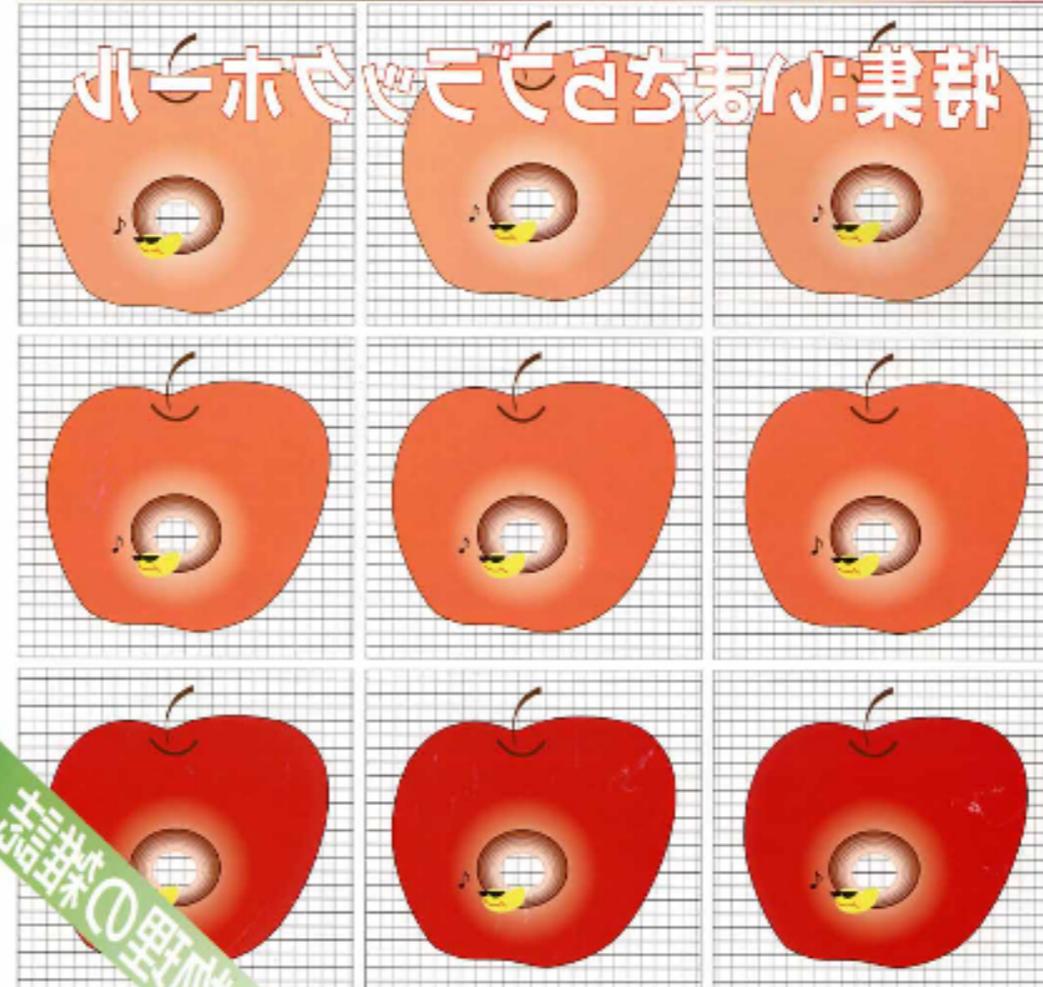
創刊号 1972年10月号
発行所 株式会社朝倉書店
〒100-0001 東京都千代田区千代田1-1-1
03-5561-1111
PHYSICS TODAY 提携

ブラックホールの誕生に迫る | ブラックホールは黒いのか

ブラックホールはどう見えるか | 明るく輝く黒い穴

ワームホールは、通過可能か? | いまこそブラックホール? | ホワイトホールの死?

特集:いまさらブラックホール



物理の雑誌

physical science magazine
Physics Today 提携

パリティ

parity
Volume 30-5

朝倉書店
〒100-0001 東京都千代田区千代田1-1-1
03-5561-1111

編集人 大橋 隆
村田 誠吾

発行所 朝倉書店
〒100-0001 東京都千代田区千代田1-1-1
03-5561-1111

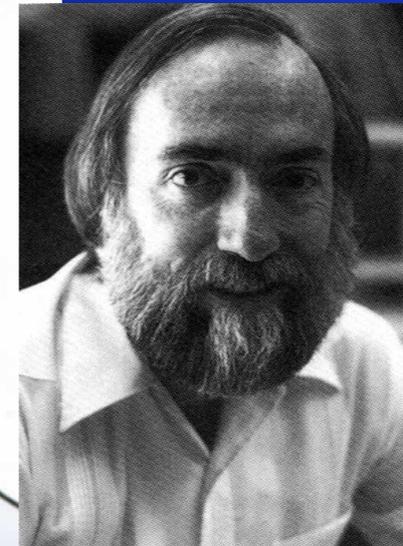
発行 朝倉書店 | 00000

通過可能なワームホール？



『コンタクト』

幼い頃から宇宙に興味をもっていた天文学者エリー。彼女はある日、宇宙からの謎の電波をキャッチする。電波の発信源は、26光年先の恒星ベガ付近。電波を解読すると、恒星間移動装置の設計図が隠されていた——。ジョディ・フォスター主演で映画化もされて、話題となった。



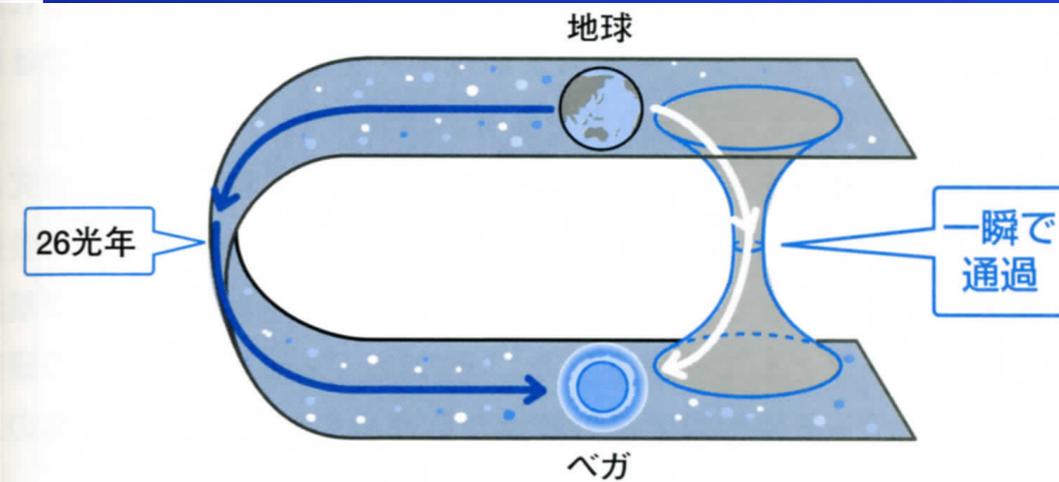
ソーン

ブラックホールを使って移動する小説を書いたけど、正しいかな？

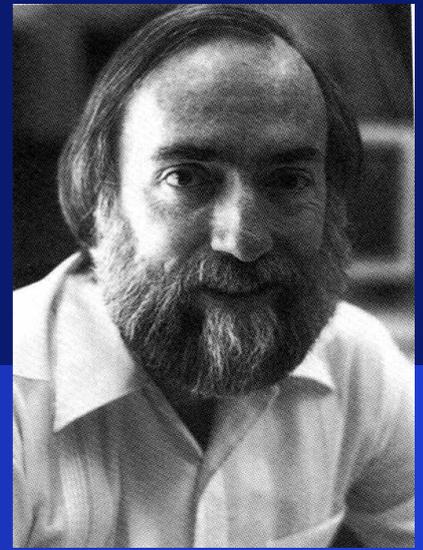
ワームホールにしたほうが現実性が増すよ。

では、そうしよう。

セーガン

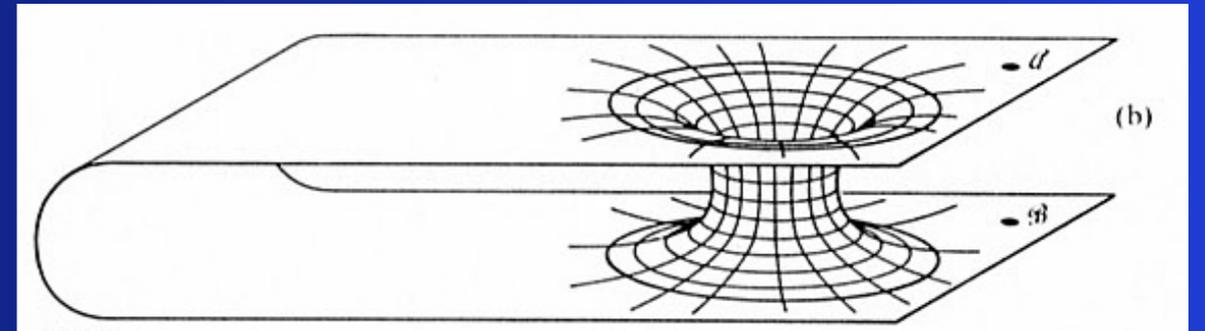


通過できるワームホールは 不可能ではない

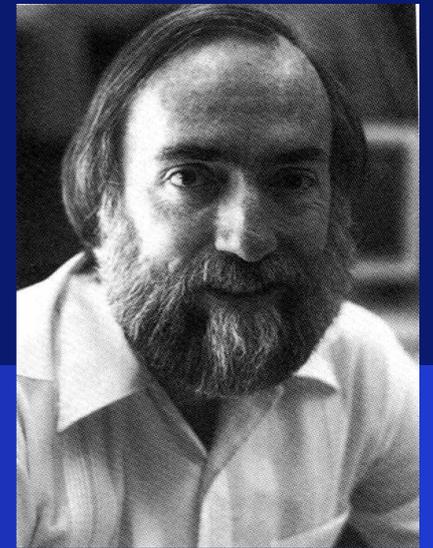


Morris, Thorne, Am. J. Phys 56 (1988) 395

「球対称で静的，一般相対性理論，漸近的平坦，潮汐力が人間に耐えられる大きさ，有限時間に通過可能」なワームホールは，**負のエネルギー**を考えれば不可能ではない。



通過できるワームホールは 不可能ではない

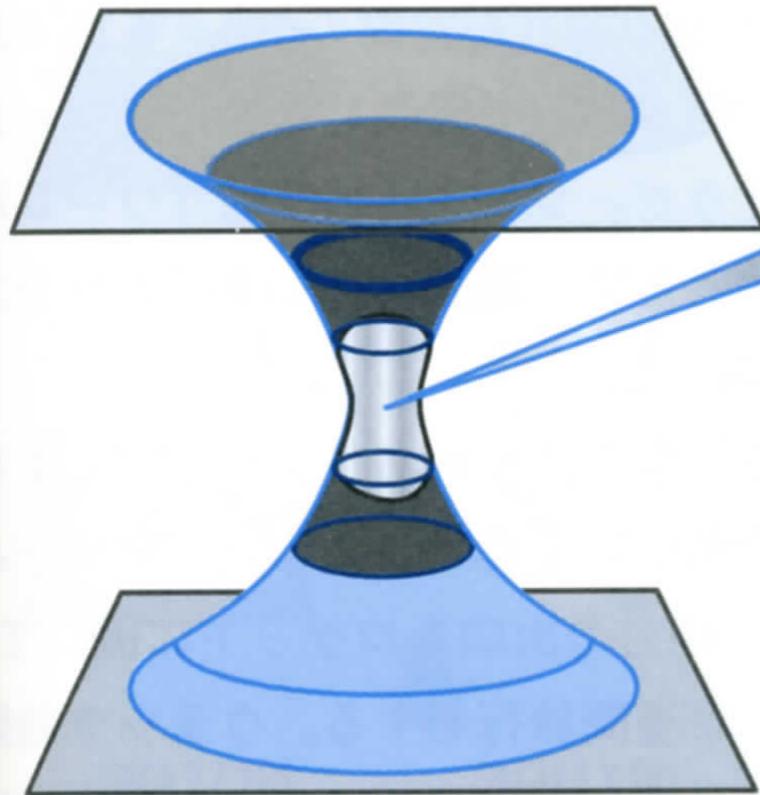


斥力を及ぼす「負のエネルギー」



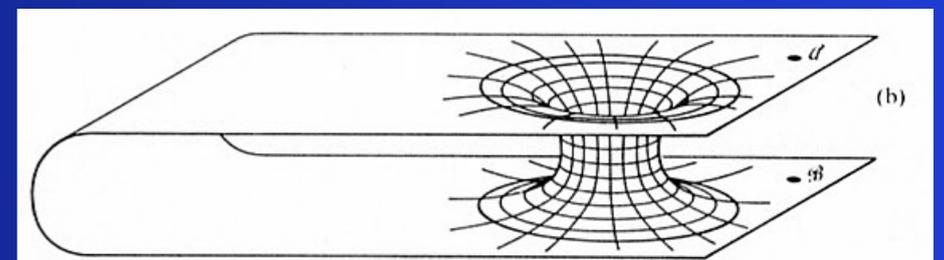
ソーン

ワームホールは、モノが入るとすぐ潰れてしまう。ワームホールを通過するには……。
そうだ、重力に逆らって、ワームホールを支える物質があればいいぞ!

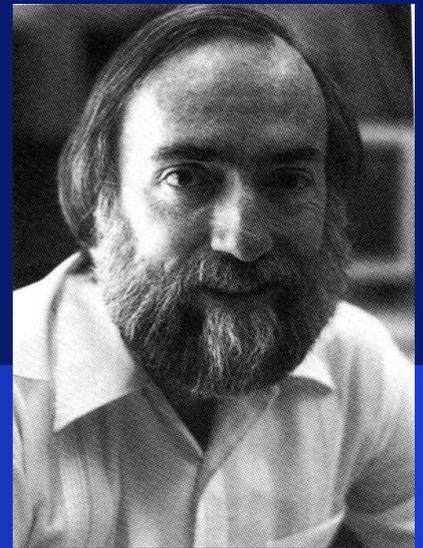


「エキゾチック」な物質
負のエネルギーを持ち、
周囲に万有斥力(反発力)
をもたらす。これをワーム
ホール内に満たせば、通
行可能になる。

万有斥力を考えるのは「禁じ手」とされていたけど、偉いソーン先生が言い出したので、解禁されたんだ。



過去へ行くタイムマシンもできる！



VOLUME 61, NUMBER 13

PHYSICAL REVIEW LETTERS

26 SEPTEMBER 1988

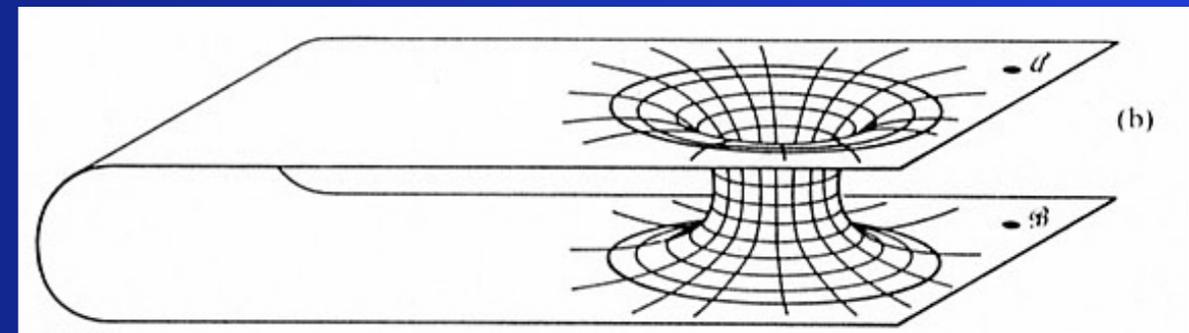
Wormholes, Time Machines, and the Weak Energy Condition

Michael S. Morris, Kip S. Thorne, and Ulvi Yurtsever

Theoretical Astrophysics, California Institute of Technology, Pasadena, California 91125

(Received 21 June 1988)

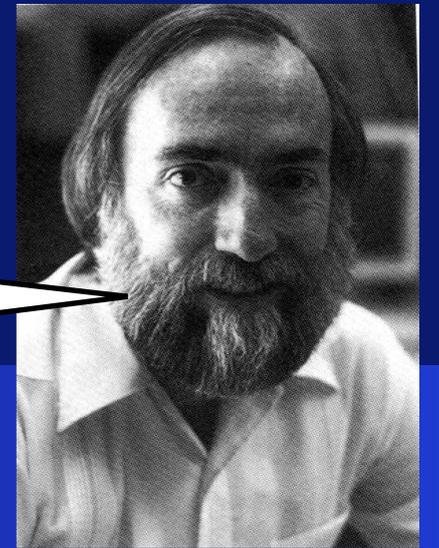
It is argued that, if the laws of physics permit an advanced civilization to create and maintain a wormhole in space for interstellar travel, then that wormhole can be converted into a time machine with which causality might be violatable. Whether wormholes can be created and maintained entails deep, ill-understood issues about cosmic censorship, quantum gravity, and quantum field theory, including the question of whether field theory enforces an averaged version of the weak energy condition.



Morris, Thorne, Yurtsever, PRL 61 (1988) 3182
片方の出口を光速近くまでに加速することができれば、
旅行者の時間は遅れるので、過去へ旅することができる。

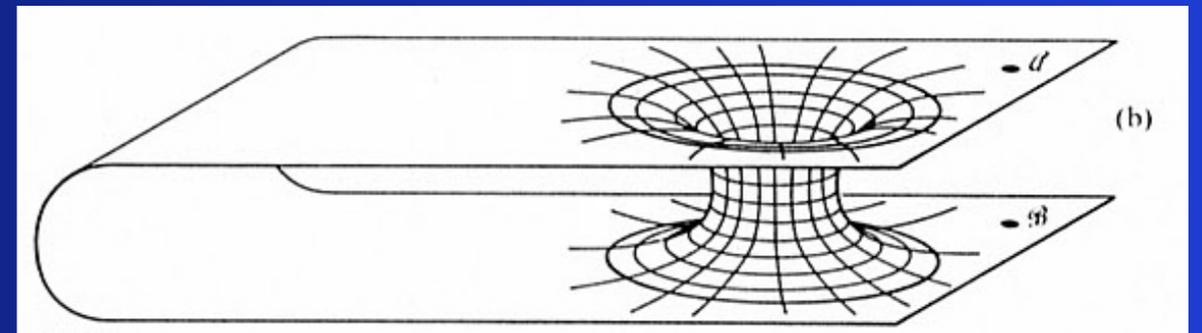
本当に？

タイムマシンはできる！



Morris, Thorne, Am. J. Phys 56 (1988) 395

「球対称で静的，一般相対性理論，漸近的平坦，潮汐力が人間に耐えられる大きさ，有限時間に通過可能」なワームホールは，**負のエネルギー**を考えれば不可能ではない。

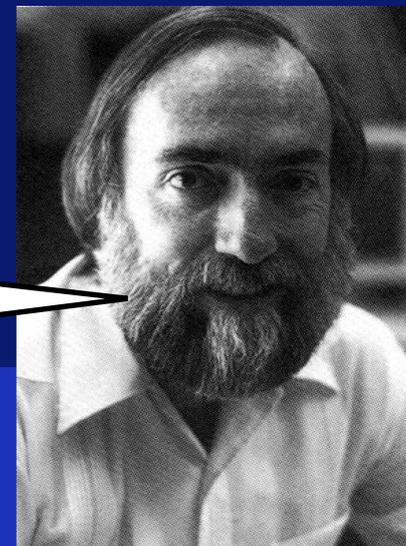


Morris, Thorne, Yurtserver, PRL 61 (1988) 3182

片方の出口を光速近くまでに加速することができれば，**旅行者の時間は遅れる**ので，**過去へ旅**することができる。

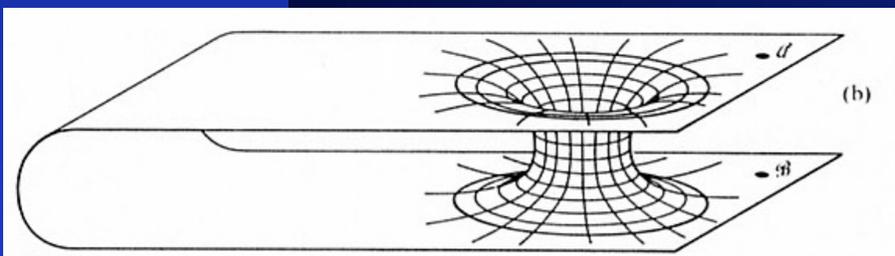
本当に？

タイムマシンはできる！



- もしワームホールが存在して、
- さらにもし負のエネルギーが安定に存在して、
- さらにもしワームホールが通過可能で、
- さらにもし人類が通過可能な技術を持ち、
- さらにもし出口を光速近くで動かすことができるならば、
- さらにもし旅行者が別ルートで同じ場所に戻れば、

タイムマシンに成り得る



No !

時間順序保護仮説を提案



そもそもワームホールは安定なのか？

PHYSICAL REVIEW D 66, 044005 (2002)

Fate of the first traversible wormhole: Black-hole collapse or inflationary expansion

Hisa-aki Shinkai*

Computational Science Division, Institute of Physical & Chemical Research (RIKEN), Hirosawa 2-1, Wako, Saitama, 351-0198, Japan

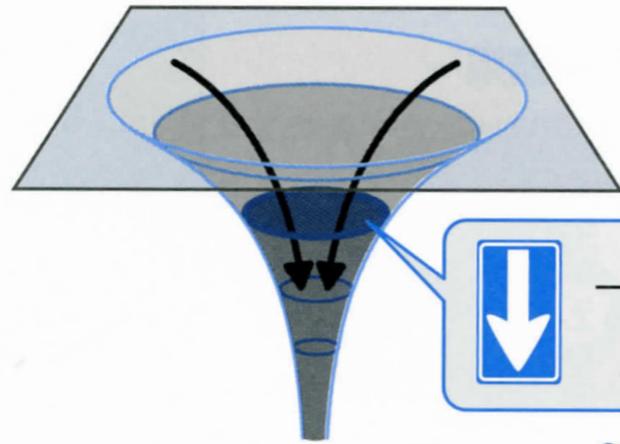
Sean A. Hayward[†]

Department of Science Education, Ewha Womans University, Seoul 120-750, Korea

(Received 10 May 2002; published 16 August 2002)

We study numerically the stability of the first Morris-Thorne traversible wormhole, shown previously by Ellis to be a solution for a massless ghost Klein-Gordon field. Our code uses a dual-null formulation for spherically symmetric space-time integration, and the numerical range covers both universes connected by the wormhole. We observe that the wormhole is unstable against Gaussian pulses in either exotic or normal massless Klein-Gordon fields. The wormhole throat suffers a bifurcation of horizons and either explodes to form an inflationary universe or collapses to a black hole if the total input energy, is, respectively, negative or positive. As the perturbations become small in total energy, there is evidence for critical solutions with a certain black-hole mass or Hubble constant. The collapse time is related to the initial energy with an apparently universal critical exponent. For normal matter, such as a traveller traversing the wormhole, collapse to a black hole always results. However, carefully balanced additional ghost radiation can maintain the wormhole for a limited time. The black-hole formation from a traversible wormhole confirms the recently proposed duality between them. The inflationary case provides a mechanism for inflating, to macroscopic size, a Planck-sized wormhole formed in space-time foam.

一方通行か、双方向可能か



ブラックホールの境界面は一方通行のみ許される。



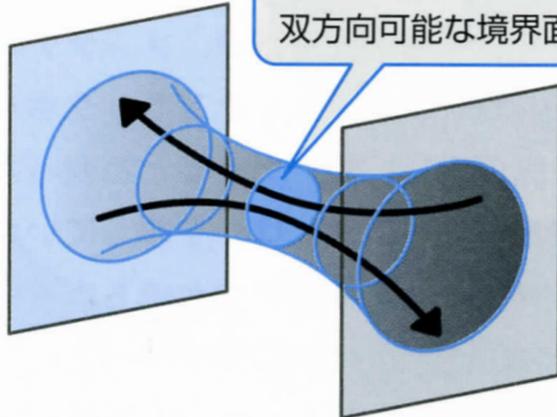
一方通行の境界面

重力崩壊では境界面が一方通行になる。

ブラックホールの蒸発現象(7章で説明)では境界面が双方向可能に変化する。



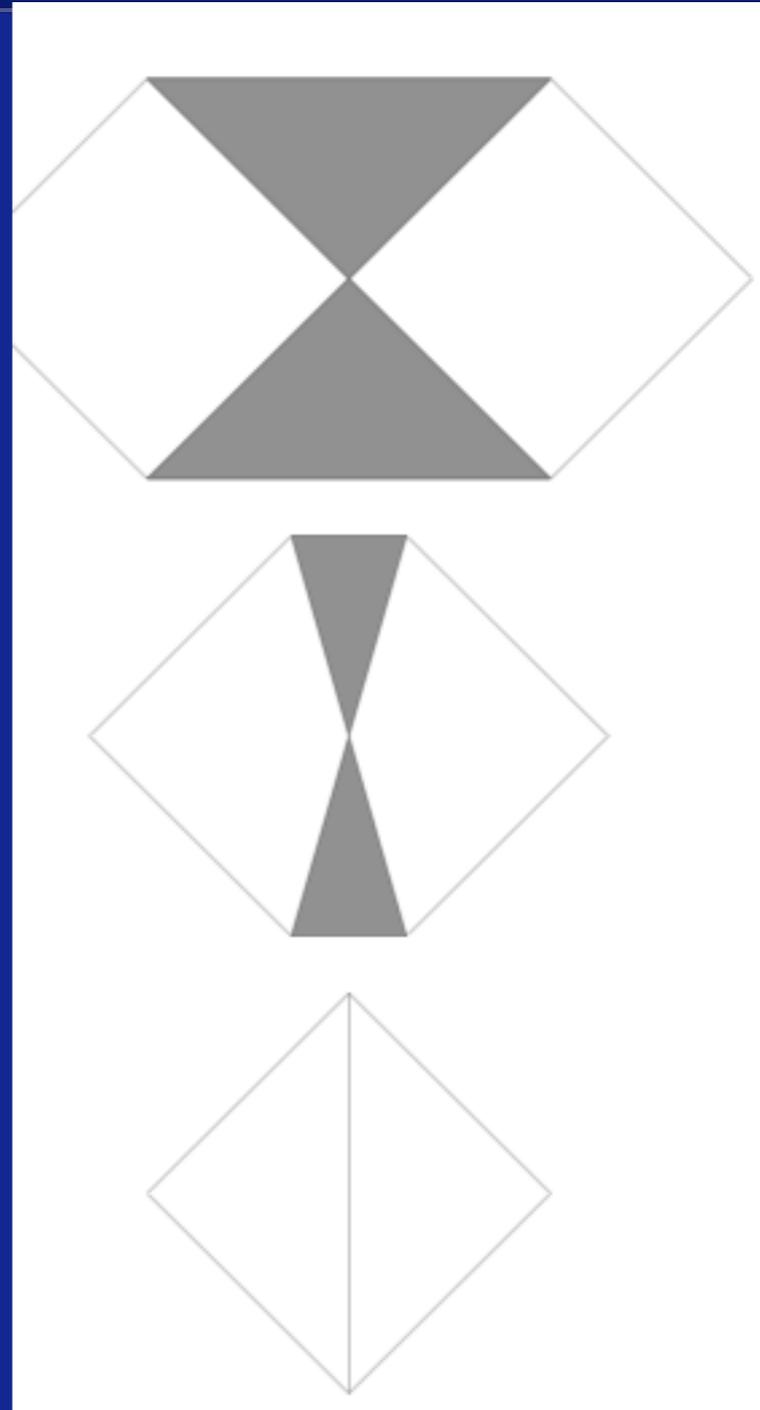
双方向可能な境界面



ワームホールの境界面は双方向通行が可能である(はず)。



ホライズン(境界面)をキーワードにして、ブラックホールとワームホールを同じように扱えるのではないかな?



ワームホールは ブラックホールか膨張宇宙に変化する！

Bifurcation of the horizons – go to a Black Hole or Inflationary expansion

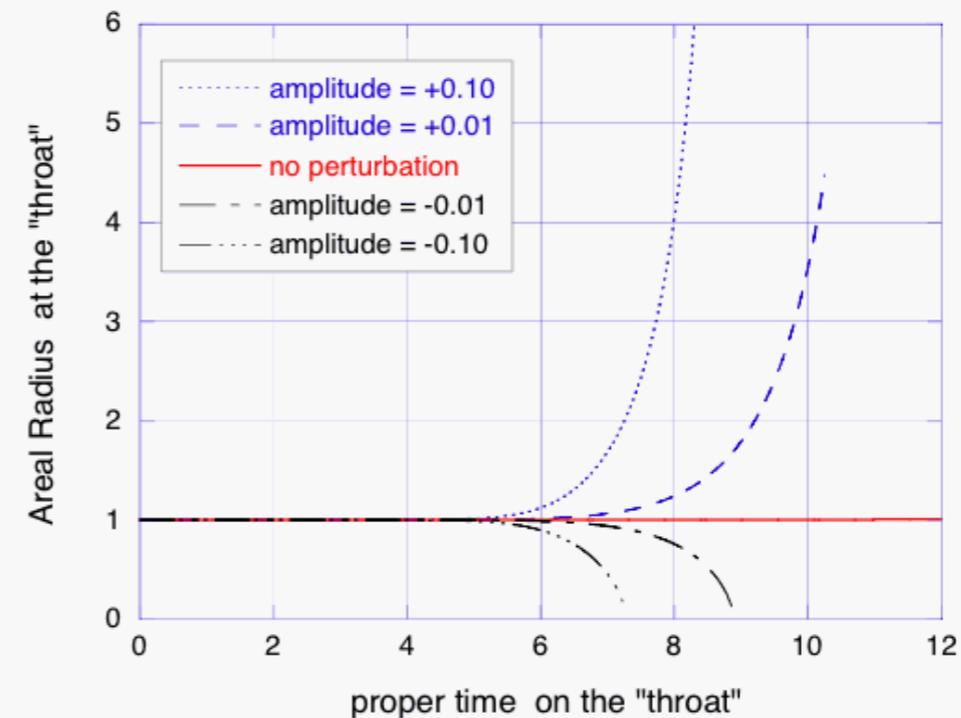
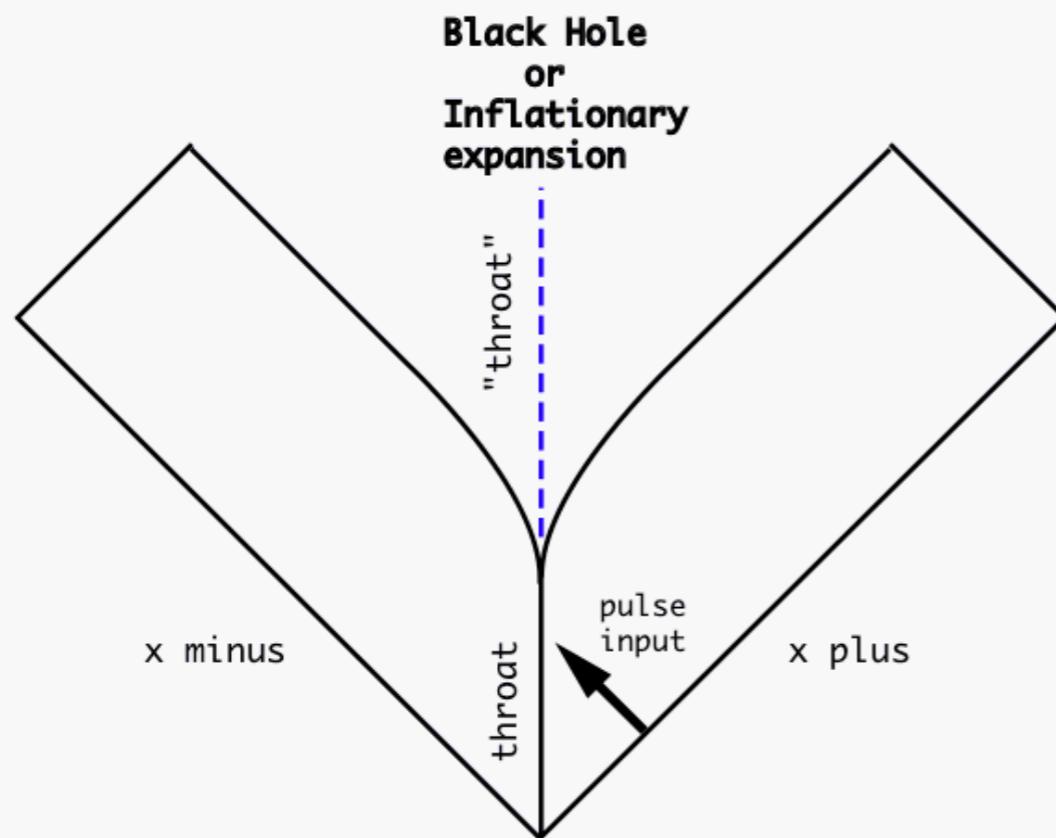


Figure 4: Partial Penrose diagram of the evolved space-time.

Figure 6: Areal radius r of the "throat" $x^+ = x^-$, plotted as a function of proper time. Additional negative energy causes inflationary expansion, while reduced negative energy causes collapse to a black hole and central singularity.

ワームホールを維持しながら通過可能

Travel through a Wormhole -- with Maintenance Operations!

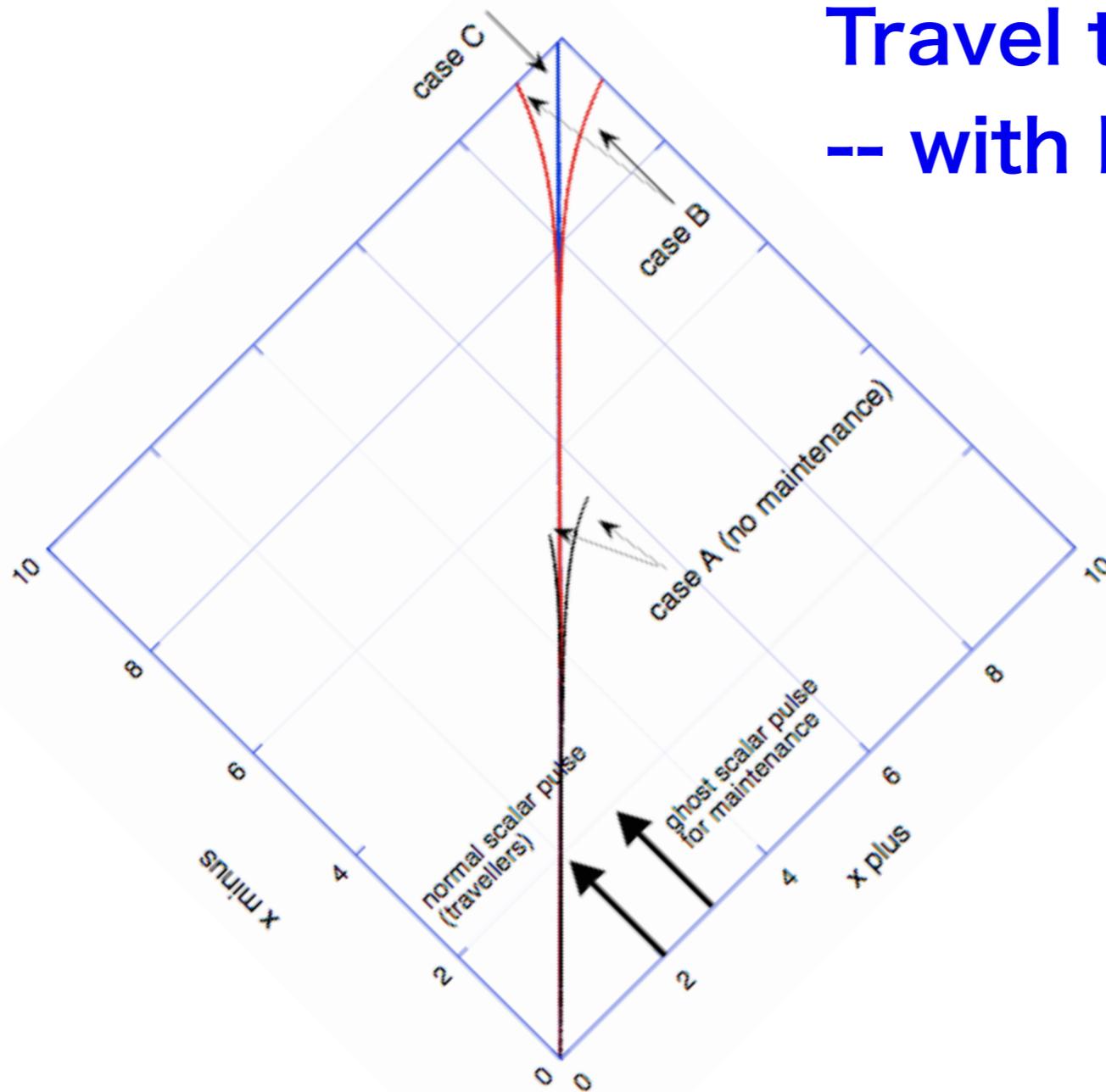
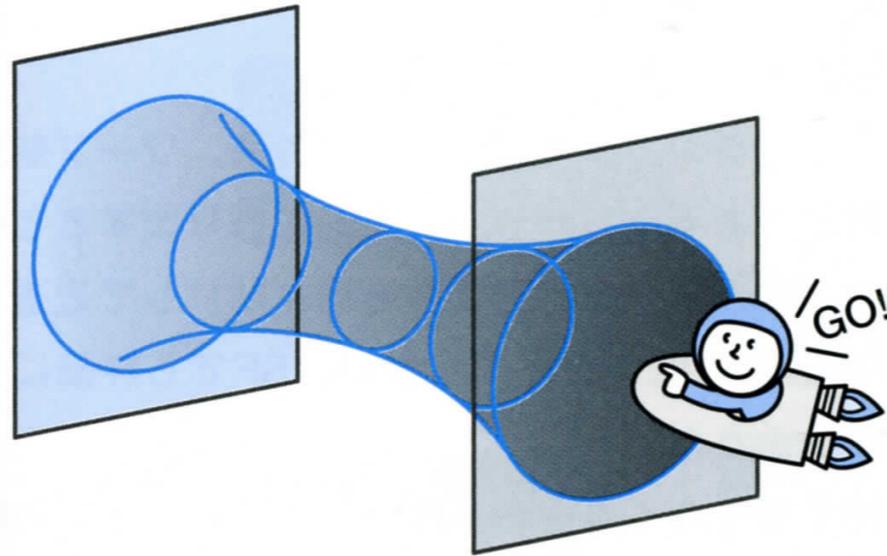
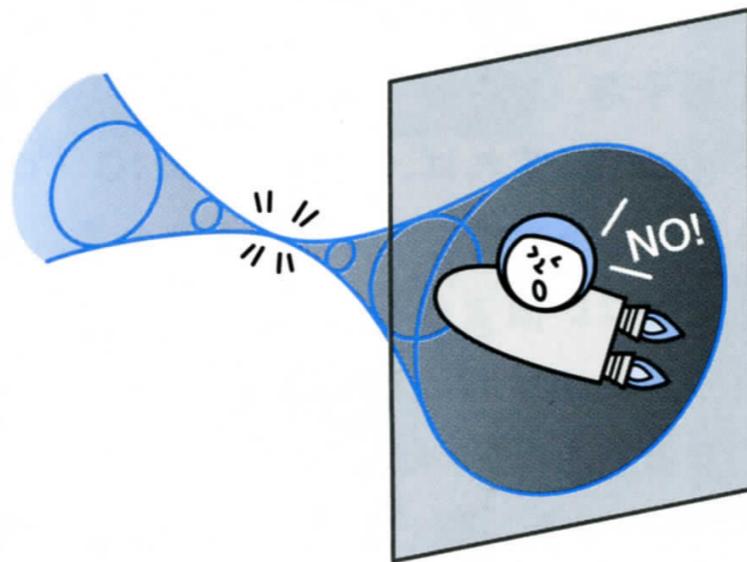


Figure 11: A trial of wormhole maintenance. After a normal scalar pulse, we signalled a ghost scalar pulse to extend the life of wormhole throat. The travellers pulse are commonly expressed with a normal scalar field pulse, $(\tilde{c}_a, \tilde{c}_b, \tilde{c}_c) = (+0.1, 6.0, 2.0)$. Horizon locations $\vartheta_+ = 0$ are plotted for three cases:
(A) no maintenance case (results in a black hole),
(B) with maintenance pulse of $(c_a, c_b, c_c) = (0.02390, 6.0, 3.0)$ (results in an inflationary expansion),
(C) with maintenance pulse of $(c_a, c_b, c_c) = (0.02385, 6.0, 3.0)$ (keep stationary structure upto the end of this range).

ワームホールを通過できるか

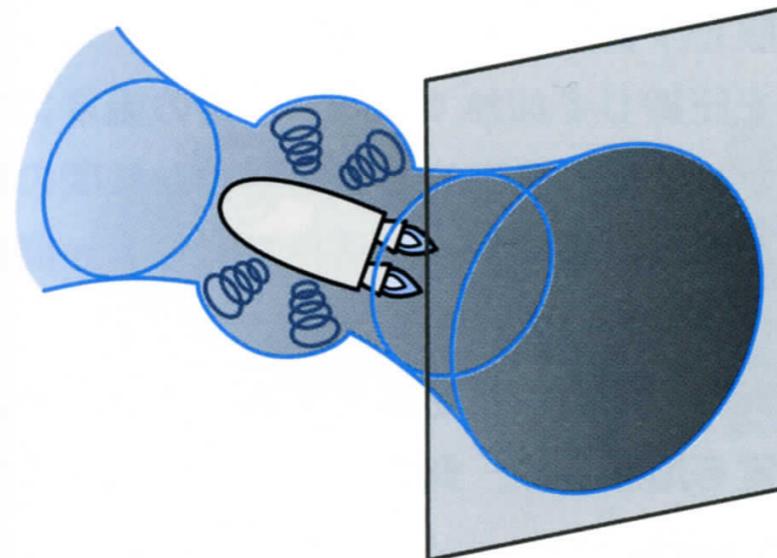


負のエネルギーで支えられているワームホールの中に、正のエネルギーの人間とロケットが入るとどうなる？



結論1

何もしないと、ワームホールは潰れてブラックホールになってしまう。



結論2

負のエネルギービームをうまく与えると、ワームホールを潰さずに通過することも可能である。

[ペン]10月1日号別冊

pen⁺

with New Attitude

一話完全収録
原画で読むドラえもん
「ぼくの生まれた日」

完全保存版
大人のための
藤子・F・不二雄



2012年9月1日発売

ドラえもん生誕100年前 記念

<http://www.pen-online.jp/feature/4386/>

膨張宇宙

big-bang cosmology

宇宙は膨張している。

そして、想定以上に加速膨張している。

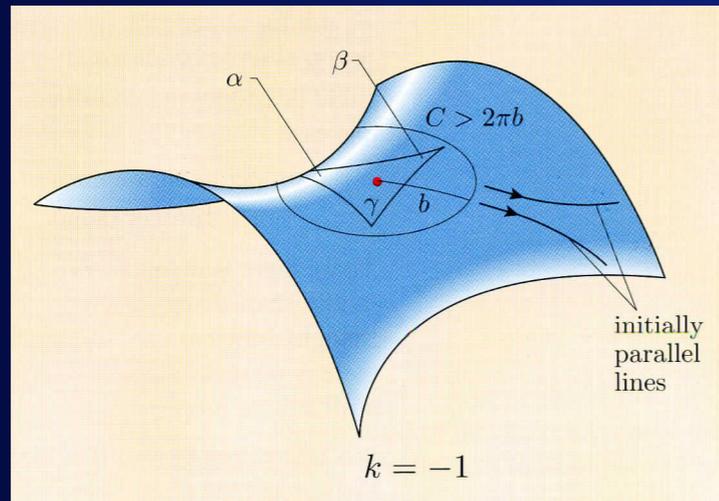
アインシュタイン方程式の解

【フリードマン解, FRW解, LFRW解】

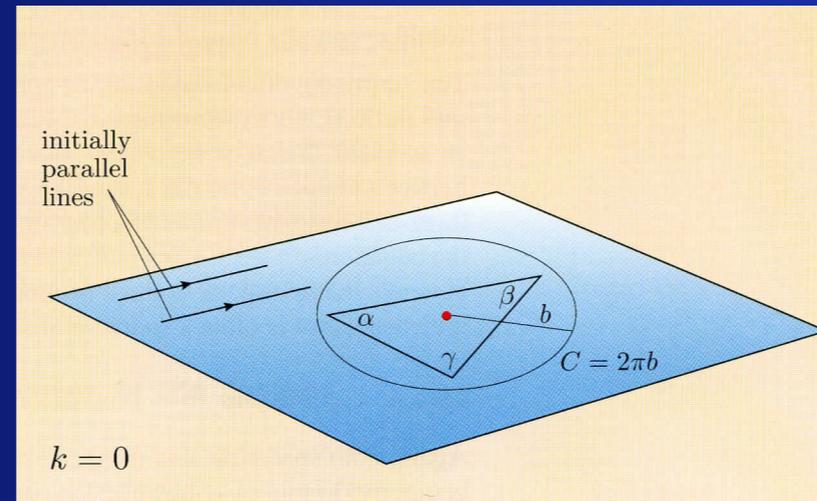
Friedmann, Robertson, Walker, Lemaitre (1920s)

完全流体, 一様等方時空 (球対称) でのEinstein方程式の厳密解

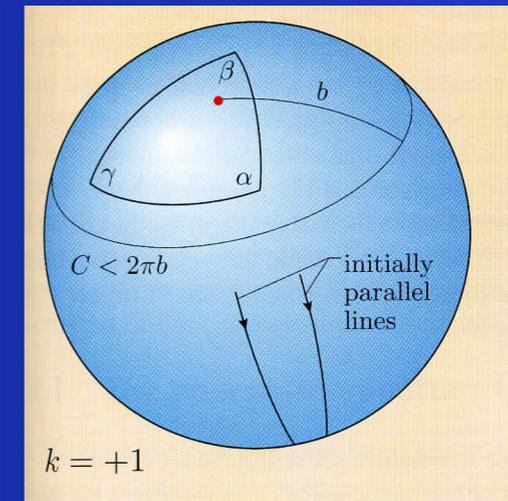
$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2) \right]$$



開いた宇宙

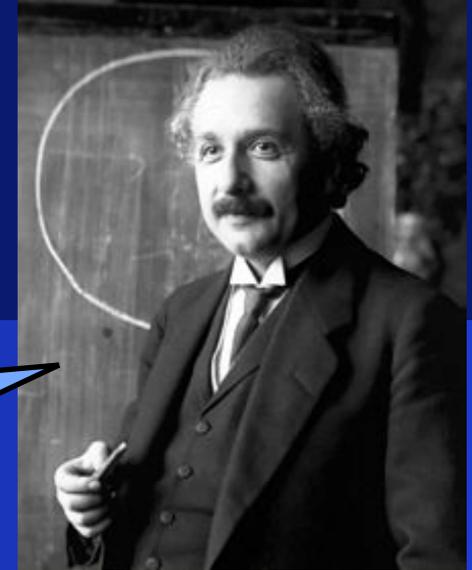


平らな宇宙



閉じた宇宙

アインシュタインは 膨張宇宙を信じなかった



「宇宙は未来永劫不変であるべきだ」

⇒定常的な宇宙モデルをつくるために，方程式を修正
(宇宙項, cosmological constant)

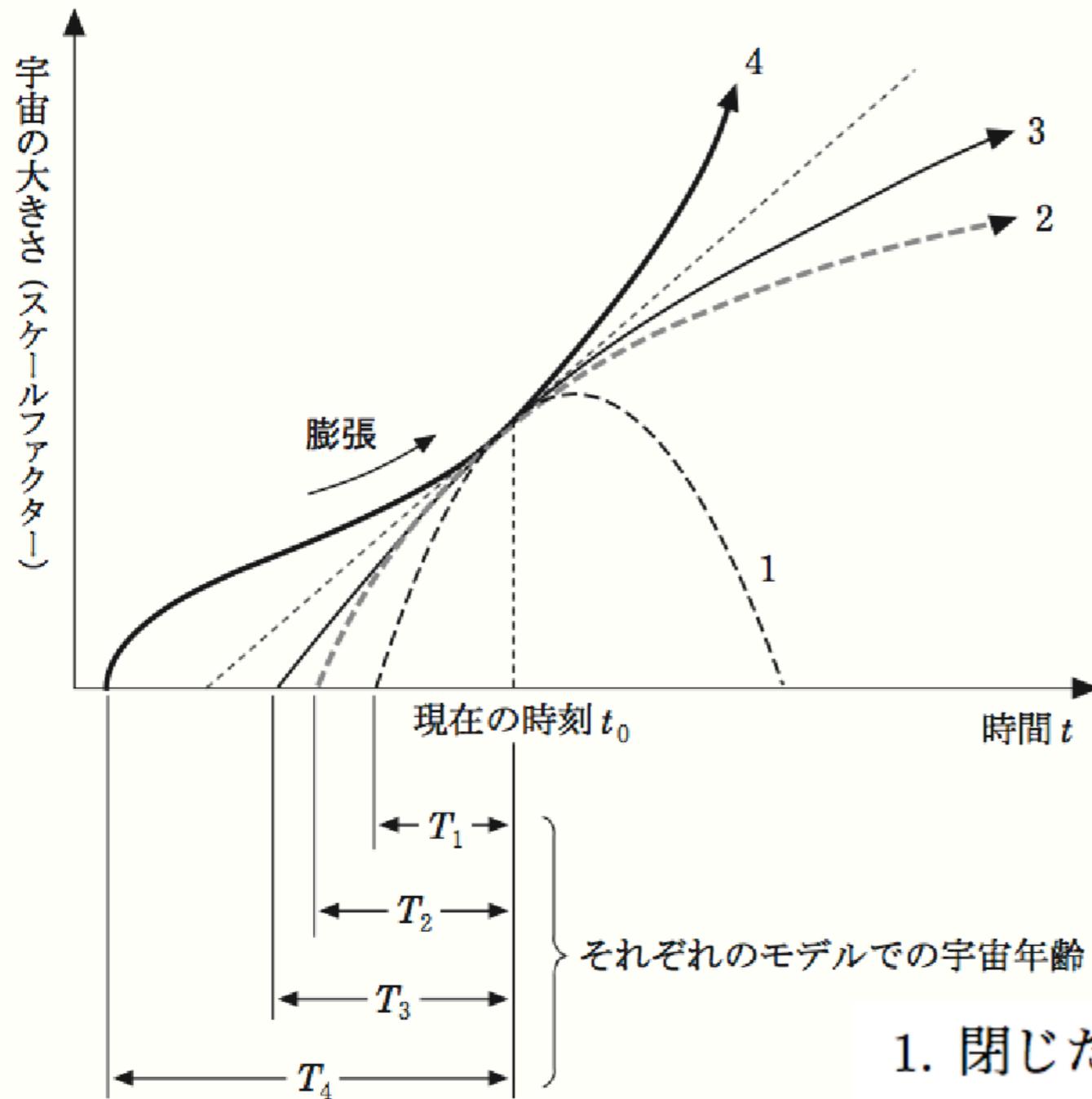
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

⇒重力（引力）作用に反対する斥力を導入

ただし，不安定なつり合いの解でしかない。

アインシュタインらしくない。

膨張宇宙モデル



1. 閉じた宇宙で宇宙項なし. $\Lambda = 0, k = +1$.
2. 平坦な宇宙で宇宙項なし. $\Lambda = 0, k = 0$.
3. 開いた宇宙で宇宙項なし. $\Lambda = 0, k = -1$.
4. 平坦な宇宙で宇宙項あり. $\Lambda > 0, k = 0$.

アインシュタインは 膨張宇宙を信じなかった



「宇宙は膨張するのが自然です」
(Lemaitre)

「あなたの計算は正しいが（こんな解を信じるなんて）あなたの物理的センスは言語道断だ。」
(Your calculation is correct, but your physical insight is abominable.)

宇宙が膨張していることは どうしてわかったのか？

1929年 ハッブル, 宇宙膨張を発見

Edwin Powell Hubble
(1889–1953)

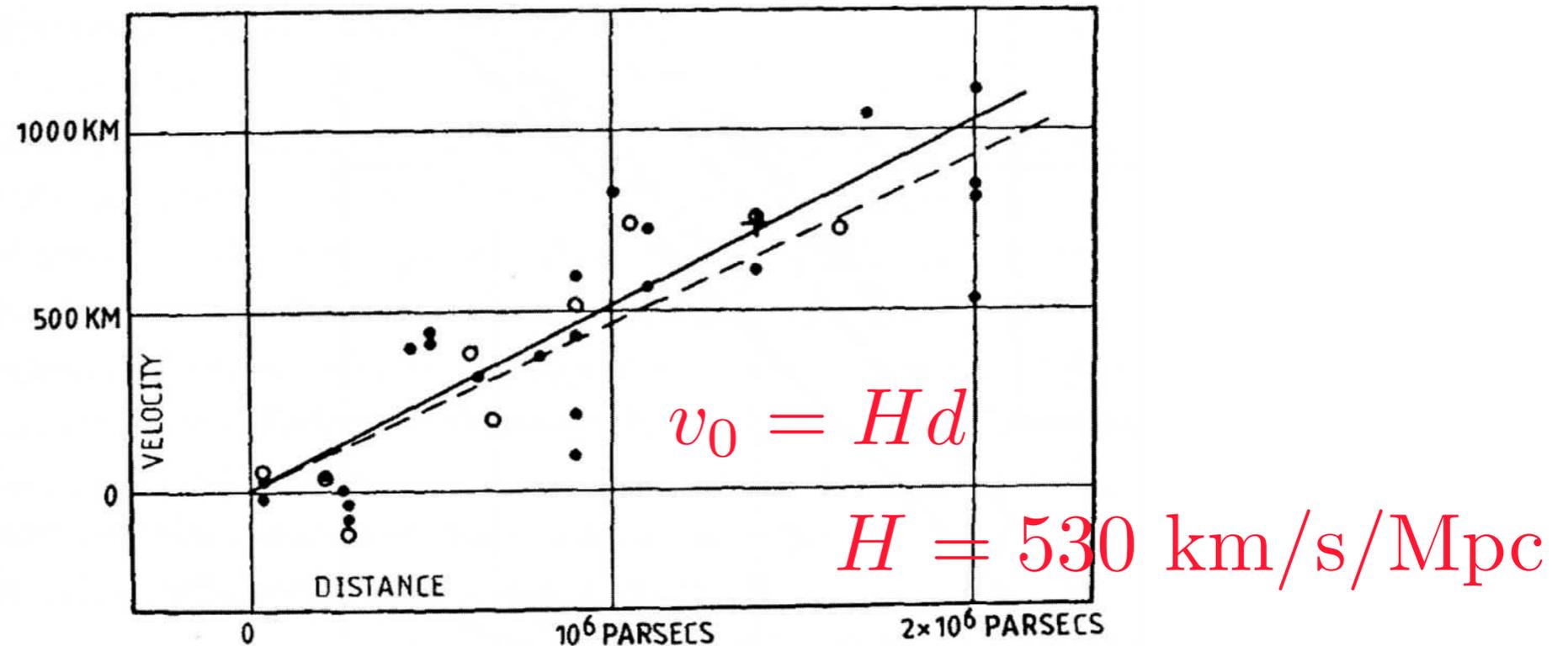
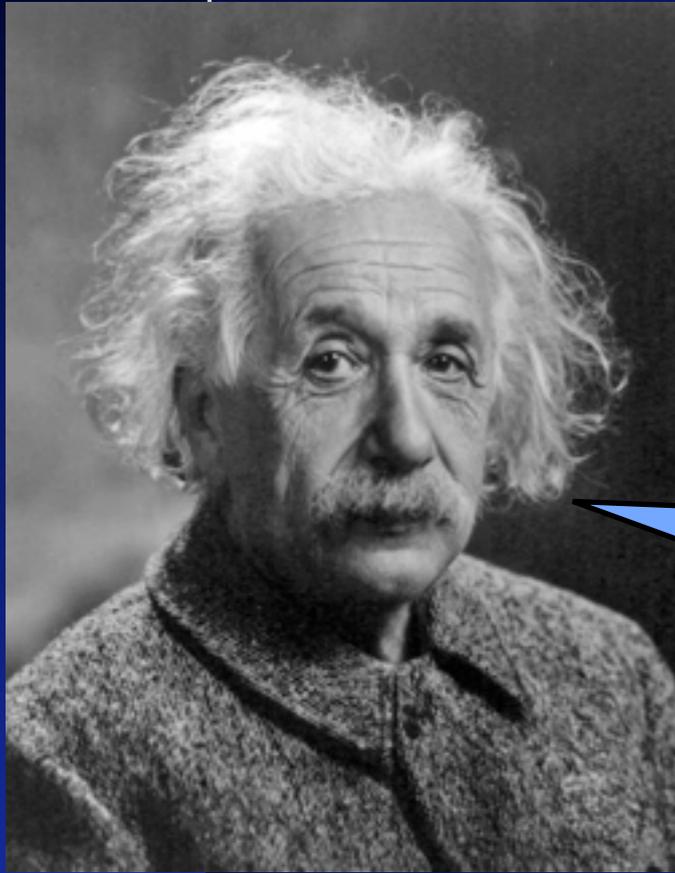


図 40: ハッブルが 1929 年に発表した図. 横軸は距離, 縦軸は銀河の後退速度. このグラフの傾きがほぼ一定になることが, ハッブルの法則である.

光の「ドップラー効果 (赤方偏移)」から

アインシュタイン, 膨張宇宙をついに信じる



Einstein, 1947

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \cancel{\Lambda g_{\mu\nu}} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

「宇宙項の導入はわが人生最大の過ちであった」
(Introduction of cosmological constant is
the biggest blunder in my life.)

火の玉宇宙論の誕生



ガモフ

宇宙膨張が本当なら，過去は小さな宇宙だったはず。宇宙のはじまりは，すべての物質とエネルギーが集まり，非常に高温で高密度の状態だったことになる。

1946年，ガモフ，「宇宙が高温高密度の火の玉の状態だったときに，短時間で元素が合成されていった」

1948年， $\alpha\beta\gamma$ ，「高温高密度の宇宙初期に起こる核反応で，すべての元素が~~す~~つくられる」

The Origin of Chemical Elements

R. A. ALPHER*

*Applied Physics Laboratory, The Johns Hopkins University,
Silver Spring, Maryland*

AND

H. BETHE

Cornell University, Ithaca, New York

AND

G. GAMOW

The George Washington University, Washington, D. C.

February 18, 1948

AS pointed out by one of us,¹ various nuclear species must have originated not as the result of an equilibrium corresponding to a certain temperature and density, but rather as a consequence of a continuous building-up process arrested by a rapid expansion and cooling of the primordial matter. According to this picture, we must imagine the early stage of matter as a highly compressed neutron gas (overheated neutral nuclear fluid) which started decaying into protons and electrons when the gas

林忠四郎 (1920-2010)

1948年, $\alpha\beta\gamma$, 「高温高密度の宇宙初期に起こる核反応で, ~~すべての~~元素がつくられる」

ビッグバン理論 = $\alpha\beta\gamma$ -Hayashi の理論

『元素合成ははじめの3分間で終了』

星の進化

恒星が主系列星となる前に, 温度がほぼ一定のまま収縮する時期があることを明らかにした (林フェイズ, 林トラック) .

恒星に対する最大半径の制約 (林の限界線) .

太陽系形成モデル

恒星・惑星系の全形成過程をモデル化した (京都モデル, 標準モデル)



火の玉宇宙論 vs 定常宇宙論

1948年, $\alpha\beta\gamma$, 「高温高密度の宇宙初期に起こる核反応で, すべての元素がつくられる」

1950年, 林, 「はじめの3分間で軽元素がつくられる」

しかし,

当時の観測データからは, 宇宙年齢は18億年

vs 地球の岩石からは, 地球年齢は30億年

定常宇宙論

「宇宙に始まりも終わりもない」



Fred Hoyle
(1915–2001)

~~火の玉~~宇宙論 VS 定常宇宙論

ビッグバン宇宙論

「宇宙には始まりがあった」

宇宙誕生後、3分で軽元素の合成がされた

「宇宙に始まりも終わりもない」

宇宙膨張をしても新たに物質が生成していれば大丈夫



ガモフ

彼らは宇宙が大きな爆発(ビッグバン)から始まったと言っている

ビッグバン, いい名前だ.
ビッグバン宇宙論, と呼ぶことにしよう



ホイール

1965年，宇宙背景輻射の発見

Discovery of CMB, 1965



Arno A. Penzias (1933–)

Robert W. Wilson (1936–)

ベル研究所，電波通信の実験

「どうしても取り除けないノイズがある」

「昼夜によらず，季節によらず，方向によらないノイズがある」

1978年，ノーベル物理学賞受賞

宇宙誕生後，30万年ほど経つと，光がさえぎられずに直進できるようになる。その時の温度が放射されて残っているはず。

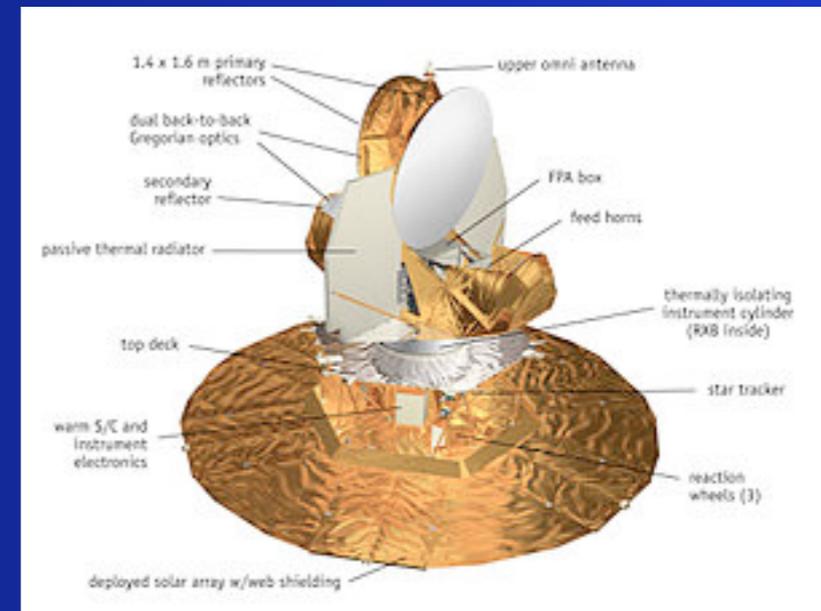
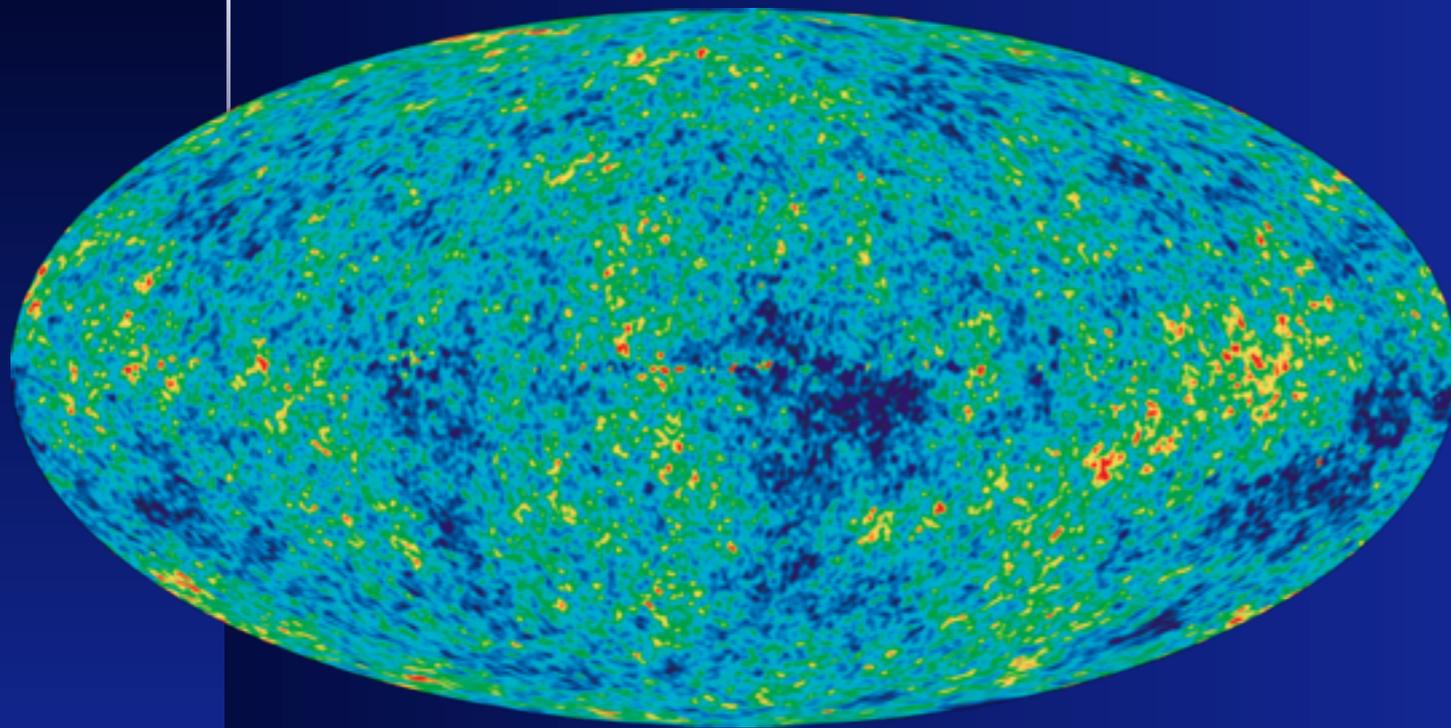
約3000 K

宇宙膨張で温度下がって

~~5=7K~~ 位
3.5K

WMAP衛星によるCMBの測定

Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, 2002



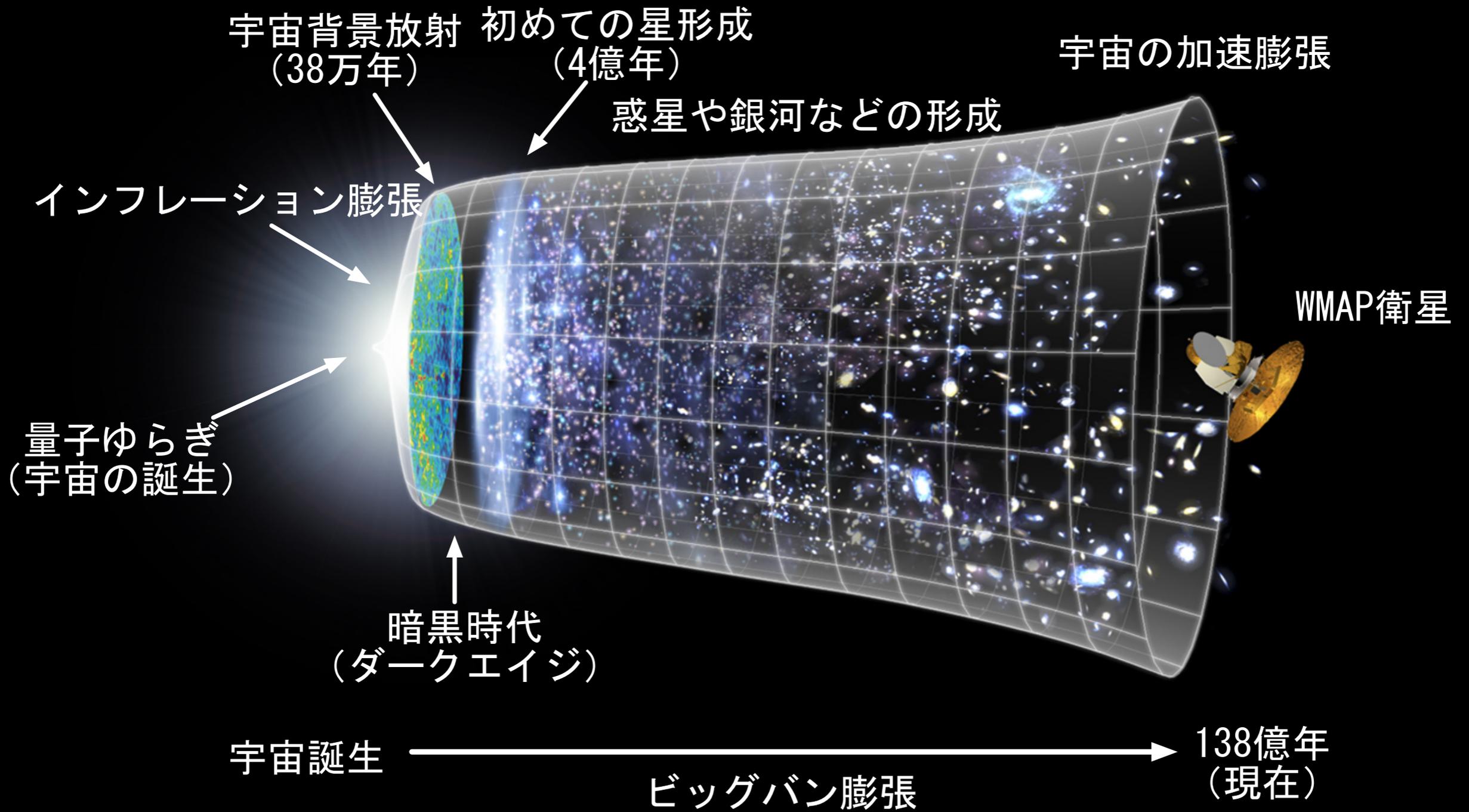
37万9000年

宇宙誕生後、~~30~~万年ほど経つと、光がさえぎられずに直進できるようになる。その時の温度が放射されて残っているはず。

約3000 K

宇宙膨張で温度下がって ~~2.73~~ K 位

2.72548±0.00057 K





全10回の講座
ご清聴ありがとうございました。